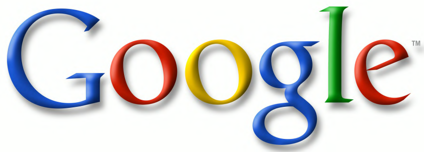
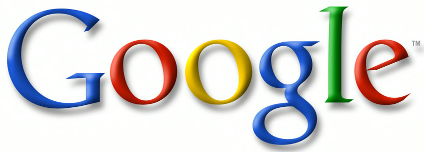



Google







3

Handbuch

der

Elektrotechnik

bearbeitet von

Professor Dr. **H. Ebert**, München. — Ingenieur **H. Eisler**, Wien. — Oberingenieur Dr. **O. Feuerlein**, Charlottenburg. — Dr. **C. Heinke**, München. — Direktor **R. O. Heinrich**, Berlin. — Ingenieur **J. Jonas**, Köln. — Oberingenieur **F. Jordan**, Bremen. — Professor Dr. **J. Kollert**, Chemnitz. — Oberingenieur Dr. **F. Niethammer**, Berlin. — Oberingenieur **Karl Pichelmayer**, Wien. — Ingenieur Dr. **M. Reithoffer**, Wien. — Ingenieur **F. Ross**, Wien. — Direktor **E. Schulz**, Magdeburg. — Direktor Dr. **E. Sieg**, Kalk bei Köln. — Professor Dr. **J. Teichmüller**, Karlsruhe, u a.

herausgegeben von

Dr. C. Heinke

Vierter Band:

Ein- und Mehrphasen-

Wechselstrom-Erzeuger

von

Oberingenieur Dr. **F. Niethammer**

Leipzig

Verlag von S. Hirzel

1900.

Ein- und Mehrphasen-

Wechselstrom-Erzeuger

von

Dr. Fritz Niethammer
Oberingenieur

Mit 656 Abbildungen

Leipzig
Verlag von S. Hirzel
1900.

Druck von Fischer & Wittig in Leipzig

Vorwort.

Für den in der Praxis stehenden Ingenieur, der nicht über der Parteien Hass und Gunst steht und der noch andere als wissenschaftlich-technische Interessen zu wahren hat, ist es gerade nicht leicht, eine Arbeit, wie die vorliegende, in befriedigender Weise abzufassen, eine Arbeit, die drei Ziele verfolgen soll:

1) das in der elektrotechnischen Litteratur zerstreut liegende Material möglichst vollständig und kritisch zu referieren,

2) die Leistungen der gesamten heutigen elektrotechnischen Industrie auf dem Gebiete der Wechselstromtechnik gebührend darzustellen,

3) Erfahrungen aus der Praxis wiederzugeben.

Obwohl es mir ohne mein Verschulden nicht möglich geworden ist, alle bedeutenden Erzeugnisse des hier behandelten Gebietes zu berücksichtigen, so haben mir doch eine grosse Zahl erster Firmen wirklich vorzügliches Material in Form von Konstruktionszeichnungen und Photographien zur Verfügung gestellt, wofür ich denselben an dieser Stelle meinen allerwärmsten Dank ausspreche; ihre Namen gehen aus dem Abschnitt: „Beschreibung moderner Typen“ hervor. Ich gebe deshalb der Hoffnung Ausdruck, dass dieser Band nicht allein dem Studierenden, sondern auch dem in der Praxis stehenden Ingenieur von Nutzen sein werde. Ich war aus diesem Grunde bestrebt, die theoretischen Entwicklungen nur insoweit aufzunehmen, als sie für die praktisch üblichen Ausführungen von Wert sind. Namentlich den graphischen Behandlungen ist ein gebührender Platz eingeräumt worden. Es ist überhaupt Wert auf bildliche Darstellungen mit knappem Text gelegt, wie dies schon aus der grossen Anzahl Figuren zu erkennen ist. Ich nahm dabei wohl berechtigterweise an, dass die Zeichnung die beste Verkehrssprache für den Ingenieur ist. Der Verlagsbuchhandlung, die bereitwilligst das reiche Illustrationsmaterial in mustergiltiger Weise zur Ausführung gebracht hat, gebührt mein besonderer Dank.

Im Anschluss an den oben genannten Punkt (1) füge ich noch einen kurzen Litteraturnachweis an. Verschiedene der nachstehenden Abhandlungen

haben mich bei der Abfassung dieses Bandes wesentlich unterstützt. Dieselben empfehlen sich als Ergänzung zu den im Text zahlreich angegebenen Quellen.

Arnold: Die Ankerwicklungen.
„ Konstruktionstafeln für den Dynamobau.
Fischer-Hinnen: Die Gleichstrommaschine.
Grawinkel & Strecker: Hilfsbuch der Elektrotechnik.
Jackson: Alternating Currents.
Kapp: Die Dynamomaschinen.
„ Elektromechanische Konstruktionen.
Kittler: Handbuch der Elektrotechnik Bd. II.
Niethammer: Generatoren, Motoren und Steuerapparate für elektrisch betriebene Hebe- und Transportmaschinen.
Pionchon: Electricité industrielle, 5[me] anneé, Grenoble.
Steinmetz: Alternating Current Phenomena.
S. Thompson: Dynamo-elektrische Maschine.
„ Mehrphasige elektrische Ströme.
Uppenborn: Kalender für Elektrotechniker.

Zeitschriften:

Bull. de la Soc. intern. des Electriciens, Paris.
Eclairage électr., Paris.
Electrician, London.
Electrical Review, New-York.
Electrical Review, London.
Electrical World, New-York.
Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin. (E. T. Z.)
Engineering, London.
Lumière électr., Paris.
Min. Proc. Inst. C. E., London.
Wiedemann's Annalen, Leipzig.

Berlin, Juni 1900.

Dr. Niethammer.

Inhaltsverzeichnis.

A. Allgemeines. Einteilung und geschichtliche Entwicklung.

B. Die Wechselspannung und die Wechselstromwicklungen.

C. Die belastete Wechselstrommaschine.

Berichtigungen.

S. 14, 19. Zeile v. u. statt „Bage“ lies „Page“.

S. 148, 6. Zeile v. o. statt „80“ lies „50“.

S. 280, 4. Zeile v. u. statt „575“ lies „575 u. 577“.

„ 2. Zeile v. u. streiche „u. 577“.

D. Magnetische Verhältnisse der Wechselstrommaschinen und die Felderregung.

E. Effektverluste und Erwärmung.

F. Antrieb und Schaltung der Wechselstrommaschinen.

G. Der Induktionsgenerator.

H. Mechanischer Aufbau.

J. Beschreibung moderner Typen.

Verzeichnis der Paragraphen.

A. Allgemeines. Einteilung und geschichtliche Entwicklung.

B. Die Wechselspannung und die Wechselstromwicklungen.

C. Die belastete Wechselstrommaschine.

D. Magnetische Verhältnisse der Wechselstrommaschinen und die Felderregung.

E. Effektverluste und Erwärmung.

F. Antrieb und Schaltung der Wechselstrommaschinen.

G. Der Induktionsgenerator.

H. Mechanischer Aufbau.

J. Beschreibung moderner Typen.

Zusammenstellung der Symbole für Band IV.

a = Lochabstand.
A = wirkliche Watt ($J \cdot E \cdot \cos\varphi$).
A_g = Gleichstromeffekt.
A_H = Hysteresisverluste.
A_r = Reibungsverlust.
A_w = Wechselstromeffekt.
A_W = Wirbelstromverluste.
A_v = Wattverluste.
AW = Ampère-Windungen.
AW_a = Ankeramperewindungen.
AW_f = Feldamperewindungen.
AW_r = resultierende Amperewindungen.
B = Kraftlinien pro 1 qcm im Eisen.
C = Kapazität in Farad.
δ = einfacher Luftabstand der Pole vom Ankereisen, Gleichförmigkeitsgrad.
d = Drahtdurchmesser in mm.
D, d = (Anker-)Durchmesser.
E = effektive Spannung in Volt.
e = variable Spannung in Volt.
ε = 2,71828..
c = Formfaktor.
E_g = Gleichspannung.
E_k = Klemmenspannung.
E_l = Spannung zwischen zwei Leitungen.
E_m = mittlere elektromotorische Kraft.
E_{max} = maximale *EMK* bezw. Spannung in Volt.
E_n = Erregerspannung.
$E_{p'}$ = Phasenspannung.
E_s = *EMK* der Streuung.
E_w = Ohmscher Spannungsabfall.
η = Wirkungsgrad, auch Steinmetzscher Hysteresiskoeffzient.
f = Reibungskoefficient.
φ, ψ, Φ = Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung.
G = Gewicht in kg.
H = *MMK* bezw. Kraftlinien pro 1 qcm in Luft.
i = variable Stromstärke in Amp.
J = effektive Stromstärke in Amp.
J_l = Stromstärke pro Leitung.
J_n = Erregerstrom.
J_k = Kurzschlussstrom.
$J_{p'}$ = Phasenstrom.
K = Gesamt-Kraftlinienzahl pro Pol in *C-G-S*.
K_a = Kraftlinien im Anker.
K_d = Drehfeldkraftlinien.
K_r = Kraftlinien im Luftraum.
K_f = Feldkraftlinien.
K_s = Streukraftlinien.
K_s = Feldstreulinien.
$K_{s'}$ = Ankerstreulinien.
K_t = variable Kraftlinienzahl.
KW = Kilowatt.
$\lambda = \frac{B_{mittel}}{B_{max}}$
l = Ankerlänge in der Ankerrichtung, ferner magnetische Weglänge.
L = Selbstinduktionskoeffizient.
L_a = äusserer *S.J*-Koeffizient.
L_i = innerer *S.J*-Koeffizient.
L_w = Wechselstrom-*S.J*-Koeffizient.
$m = P : \tau$.
μ = Permeabilität.
n = Periodenzahl pro 1 Sek.
n_s = Schlüpfung.
$\omega = 2\pi n$.
$2p$ = Polzahl.
P = Polbogenlänge.
PS = Pferdestärken.
p' = Phasenzahl.
q = Drahtquerschnitt in qmm, Querschnitt überhaupt in cm^2.
q_1, q_2 = Leiter pro Pol und Phase (pro Spulenseite).
s = Spulenbreite.
S = Oberfläche.
σ = Widerstandskoeffizient.
t = Zeit in Sekunden.
T = Temperatur in ^{0} C. und Zeitdauer einer Periode.
T_a = Aussentemperatur.
τ = Polteilung.
Θ = Trägheitsmoment.
u = Tourenzahl pro Minute.
v = Geschwindigkeit in $\frac{m}{sec}$.
V = Volumen in cbcm.
w = Widerstand in Ω.
w_a = äusserer Widerstand.
w_i = innerer Widerstand.
w_n = Nebenschlusswiderstand.
W_s = scheinbarer Widerstand.
w_w = Wechselstromwiderstand.
y = Wickelschritt.
z = Windungszahl pro Phase.
Z = Zahl der wirksamen Leiter pro Phase.
Z_t = totale Leiterzahl.

A. Allgemeines.
Einteilung und geschichtliche Entwicklung.

I. Allgemeines. Einteilung der Wechselstrommaschinen.

Wird eine Drahtschleife (Fig. 1) von einem Magnetfeld durchsetzt, das abwechselnd zu- und abnimmt, so entsteht in derselben eine abwechselnd positiv und negativ gerichtete elektromotorische Kraft, welche in einem geschlossenen Kreis einen sogenannten Wechselstrom erzeugt (vgl. hierzu[1]) auch Bd. I). Der Wechsel in der Stärke des magnetischen Feldes kann auf drei verschiedene Arten erzeugt werden: § 1. Theoretische Erzeugung von Wechselspannungen.



Fig. 1.

1 a) Es kann die Drahtschleife gegenüber dem Magnetfeld oder

1 b) das Magnetfeld gegenüber der Drahtschleife bewegt werden.

2) Es kann die magnetische Permeabilität in der Nähe der Spule periodisch verändert werden, während Spule und Magnetfeld feststehen.

3) Die feststehende Schleife kann durch ein wechselndes Magnetfeld induziert werden, das durch einen Wechselstrom erzeugt wird.

Die dritte Gruppe setzt also einen Generator der beiden ersten Arten voraus und gehört nicht zu den eigentlichen Wechselstrommaschinen. Die entsprechenden Apparate werden allgemein Wechselstromtransformatoren genannt. Zu Gruppe 3 gehören allerdings auch die asynchronen Induktionsgeneratoren.

Die Bewegung der Schleife oder des Magnetfeldes oder des Materials zur Veränderung der Permeabilität kann eine drehende oder eine hin- und hergehende sein. Die drehende Bewegung ist praktisch weitaus am üblichsten.

Sowohl zur Erzeugung brauchbarer Spannungen als auch zur Erzeugung starker Ströme werden in den Wechselstrommaschinen, gerade wie in den Gleichstrommaschinen, eine grössere Anzahl Drahtspulen entweder hintereinander oder parallel geschaltet. Eine praktische Wechselstrommaschine besteht also aus einem Anker, der die induzierten Spulen enthält, und einem Feldgestell mit beliebig grosser Polpaarzahl.

---

1) Siehe auch PIONCHON, Electricité industrielle, 5. Jahr, Grenoble, dem manche Anregungen und verschiedene Figuren entnommen sind.

Während bei Gleichstrommaschinen wohl nur die induzierten Spulen die Bewegung auszuführen haben und das Magnetgestell feststeht, sofern man nicht zu rotierenden Bürstengruppen greifen will, ist es bei Wechselstrommaschinen gleichgültig, ob der induzierte oder der induzierende Teil die Bewegung ausführt; es können sogar die das Feld erzeugenden Spulen und die induzierten Spulen feststehen, wobei es, wie schon erwähnt, nur nötig ist, dass die magnetische Reluctanz periodisch geändert wird.

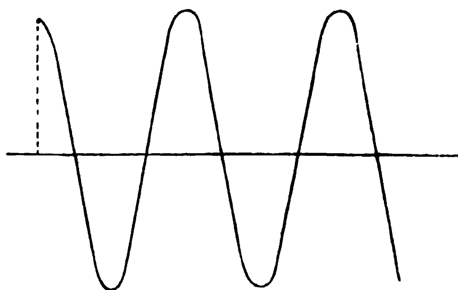


Fig. 2.

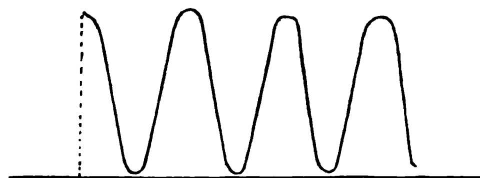


Fig. 3.

§ 2. Typen von Wechselstrommaschinen.

Das Magnetfeld der Wechselstrommaschinen der obigen Gruppe 1 ändert sich gemäss Fig. 2 von einem positiven Maximum durch den Wert 0 zu einem negativen Maximum und wiederum durch Null zu einem zweiten positiven Maximum (Wechselpoltype). Bei der Gruppe 2 bleibt das Feld meist[1])

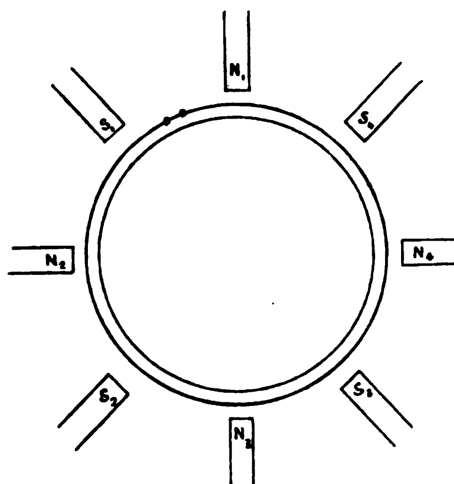


Fig. 4.

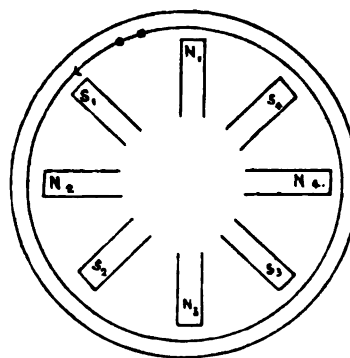


Fig. 5.

gleichgerichtet, es schwankt nur gemäss Fig. 3 zwischen einem Höchst- und einem Mindestwert, letzterer ist gewöhnlich annähernd 0, bezw. gleich der Remanenz: Gleichpoltype, Induktortype, Induktionstype. Zur Er-

1) Es werden zwar neuerdings auch Maschinen der Induktortype gebaut, die zur Wechselpoltype gehören.

höhung der Induktionswirkung werden die induzierten Spulen in modernen Wechselstrommaschinen fast ausnahmsweise auf Kerne gewickelt, die hohe magnetische Permeabilität besitzen (d. h. aus Eisen bestehen).

Das vielpolige Magnetfeld kann entweder innerhalb oder ausserhalb des mit den induzierten Spulen versehenen Ankers angeordnet sein, was zu der Unterscheidung Aussenpolmaschinen (Fig. 4) und Innenpolmaschinen (Fig. 5) führt. Es kann in beiden Fällen entweder das Magnetgestell oder der Anker rotieren. Die Fig. 6 zeigt eine Kombination einer Innenpolmaschine mit einer Aussenpolmaschine. Ausserdem lässt sich aber auch der Magnetkranz auf der Seite des Ankers anbringen, und zwar entweder einseitig oder beiderseitig, was entweder zu der als Flachring bekannten Maschinenform oder zum Scheibenanker führt. Bei sich gegenüber stehenden Doppelkränzen können die in einem Kranze liegenden Pole gleichnamig oder ungleichnamig sein. Im letzten Fall (Fig. 7) handelt es sich um einen wechselnden Kraftlinienfluss, im ersten Fall (Fig. 8) nur um einen ondulierenden, der sein Zeichen nicht wechselt.

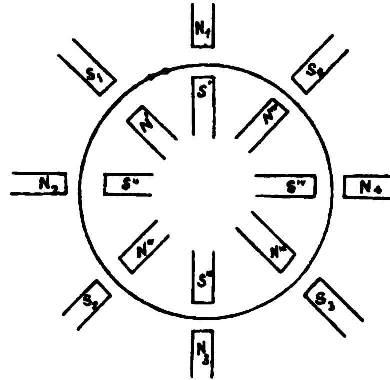


Fig. 6.

Der Anker einer Wechselstrommaschine kann gerade wie derjenige einer Gleichstrommaschine als §8. Ankertypen.

Trommel-, Ring-, Scheiben- oder Pol-(Zacken-)Anker

gewickelt werden. Die Anordnung der Scheibenanker ist im allgemeinen einer Flachringwicklung ähnlich, die Spulenachsen sind jedoch parallel zur

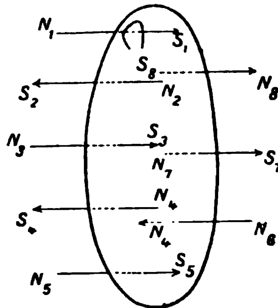


Fig. 7.

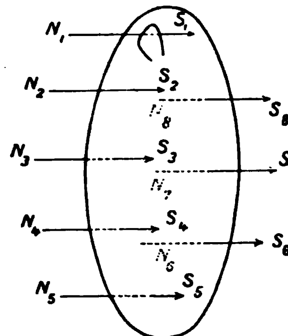


Fig. 8.

Maschinenachse; die Magnetanordnung ist ebenfalls nicht radial, sondern achsial. Der Polanker weist gerade wie ein Feldgestell eine Reihe Vorsprünge auf, die die induzierte Wicklung tragen. Die Trommelwicklung wird entweder wie bei Gleichstrom als Schleifenwicklung oder als Wellenwicklung ausgeführt, weitaus häufiger werden jedoch einfach auf dem Ankerumfang nebeneinander oder übergreifend Spule an Spule gereiht (Spulenanker), wie

dies später noch ausführlich erläutert werden wird. Bei Trommelwicklung liegen für Innenpolmaschinen die Spulen auf der Innenseite des induzierten Kernes (Fig. 5), für Aussenpolmaschinen auf der Aussenseite (Fig. 4). Die Ringwicklung bleibt für beide Typen dieselbe.

Je nachdem die Wicklung in offene, halboffene oder geschlossene Nuten bezw. auf einen glatten Kern gelegt wird, unterscheidet man Nutenanker,

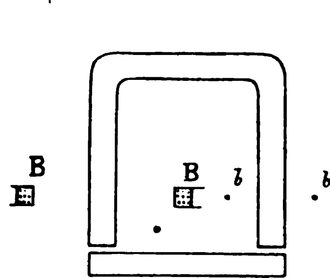


Fig. 9.

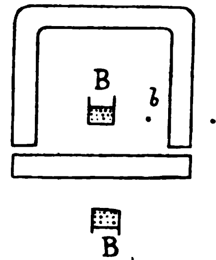


Fig. 10.

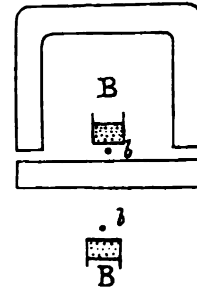


Fig. 11.

Lochanker und glatte Anker. Wickelt man, wie schon erwähnt, auf Polansätze, so spricht man von Pol- oder Zackenarmaturen. Bei glatten Ankern lassen sich entweder die Spulen auf den Ankerkern aufwickeln oder aber fertiggewickelt auflegen (Spulenanker).

§ 4. Induktortype. Für die zweite Gruppe von Wechselstrommaschinen mit wechselnder Permeabilität giebt es ebenfalls eine Reihe verschiedener Dispositionen. In

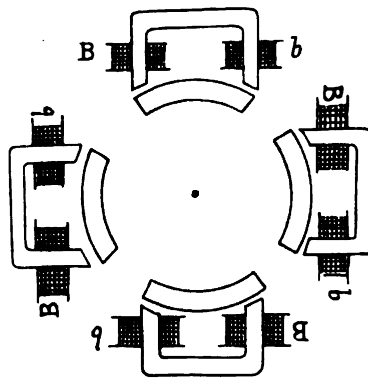


Fig. 12.

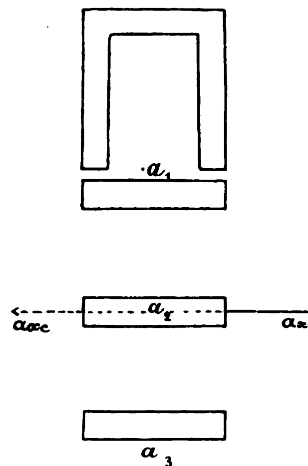


Fig. 13.

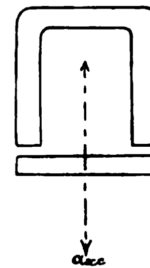


Fig. 14.

Fig. 9 ist *B* die induzierende, das Magnetfeld erzeugende Spule, *b* die induzierte Spule; die Achsen beider sind parallel. Das Schlussstück für den hufeisenförmigen Magneten ist beweglich angeordnet. Aus Fig. 10 ist ersichtlich, dass die Magnetspule *B* auch senkrecht mit ihrer Achse zur induzierten Spule *bb* stehen kann. In Fig. 11 sind beide Wicklungen um den drehenden Teil, um das magnetische Schlussstück gelegt.

Die Drehachse der Induktionstype lässt drei verschiedene Lagen zu und zwar kann der drehende Teil einen Ring[1]) (Fig. 12) oder einen langgestreckten Cylinder (Fig. 13, 15 u. 16) oder auch eine platte Scheibe (Fig. 14) beschreiben.

Die besprochene Einteilung lässt sich in übersichtlicher Weise durch eine Tabelle[2]) darstellen: § 5. Einteilung der Wechselstrommaschinen.

A. Wechselpoltypen.

1 a) Ringwicklung mit Aussenpolen.
1 b) „ „ Innenpolen.
1 c) „ „ seitlichen Polkränzen (Flachring).
2 a) Trommelwicklung mit Aussenpolen.
2 b) „ „ Innenpolen.
2 c) „ „ Aussen- und Innenpolen.
3 a) Scheibenanker mit wechselndem Kraftlinienfluss.
3 b) „ „ ondulierendem „

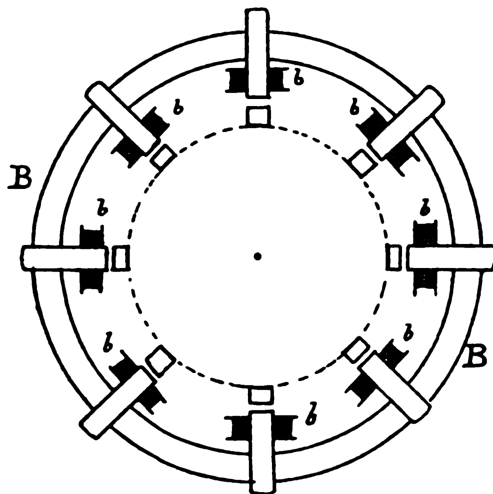


Fig. 15.

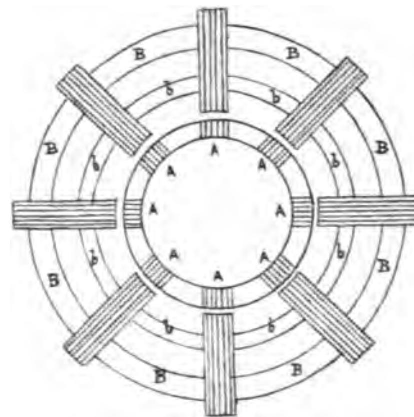


Fig. 16.

B. Gleichpoltypen, Induktortypen.[3])

1 a) Ringwicklung 1 b) Trommelwicklung 1 c) Scheibenanker	Achse der induzierten und induzierenden Spulen parallel und getrennt (Fig 9).
2 a) Ringwicklung 2 b) Trommelwicklung 2 c) Scheibenanker	Achse der induzierten und induzierenden Spulen senkrecht zu einander (Fig. 10).
3 a) Ringwicklung 3 b) Trommelwicklung 3 c) Scheibenanker	Induzierte und induzierende Spulen ineinander mit gemeinsamer Achse (Fig. 11).

---

1) In Fig. 12, 15 u. 16 bedeuten *b* die induzierten, *B* die erregenden Spulen; die schraffierten Stücke in Fig. 16 sind Eisen.
2) Siehe PIONCHON, Electricité industrielle, 5. Jahr, Grenoble.
3) Wie erwähnt, giebt es auch Wechselpol-Induktortypen, allerdings nur vereinzelt.

Ein weiterer Gesichtspunkt teilt ein in Wechselstrommaschinen

mit Eisen (am üblichsten),
ohne Eisen (fast gänzlich veraltet).

§ 6. Erregung. Sowohl bei der Gleichpol- als bei der Wechselpoltype lässt sich die Erregerwicklung auf verschiedene Weise ausführen:

a) jeder Pol hat seine eigene Erregerspule,
b) nur jeder andere Pol hat seine Erregerspule,
c) für sämtliche Pole ist nur eine gemeinsame Erregerspule vorhanden.

Bezüglich der Erregung lassen sich noch unterscheiden: Wechselstrommaschinen mit permanenten Magneten, die veraltet sind; Maschinen mit Elektromagneten und zwar mit Sondererregung, die am üblichsten sind, oder mit Selbsterregung oder mit gemischter Erregung, d. h. mit Compoundwicklung zur Konstanthaltung der Klemmenspannung.

§ 7. Ein- und Mehrphasenströme. Je nach der Stromart, die man einer Wechselstrommaschine entnimmt, ist dieselbe eine Einphasen- oder Mehrphasenmaschine. In letzterer sind die einzelnen Wicklungssysteme um bestimmte Winkel versetzt. Von den Mehrphasenmaschinen kommen eigentlich nur die zwei- und dreiphasigen in Frage, für Umformerzwecke höchstens noch sechsphasige. Ein Zwischending zwischen Ein- und Mehrphasenmaschinen bildet das sogenannte monocyklische System mit einer Hauptphase und einer senkrecht dazu stehenden Hilfsphase.

Sämtliche Wechselstrommaschinen eignen sich durch entsprechende Abzweigungen von der Wicklung ohne weiteres zur Speisung von Drei- und Mehrleiteranlagen.

§ 8. Aufbau. Obwohl es vom theoretischen Standpunkt aus gleichgültig ist, welcher Teil einer Wechselstrommaschine rotiert, so ist dies doch für die Stromzu- oder -abführung von einer gewissen Bedeutung. Rotiert der induzierte Teil, so müssen die Wechselströme durch Schleifringe und Bürsten abgeführt werden, was neuerdings bei Spannungen von über 1000 Volt kaum mehr ausgeführt wird (in Amerika bis 3000 Volt). Die Zuführung zu der Erregerwicklung ist in diesem Fall feststehend. Rotiert der Magnetstern mit den Erregerspulen, so sind nur zwei Schleifringe für den Erregerstrom notwendig. Die Zuführung dieses niedergespannten Gleichstroms ist stets in einfacher und betriebssicherer Weise möglich. Bei der Induktortype ist überhaupt keine bewegliche Stromzuführung erforderlich, es rotiert nur ein völlig unbewickelter Eisenkranz.

Der äussere Aufbau einer Wechselstrommaschine kann entweder für Riemen- oder Seilantrieb oder, was besonders für Maschinen über 300 bis 500 KW immer üblicher wird, für direkte Kuppelung mit der Antriebsmaschine ausgeführt werden. Die Achse liegt gewöhnlich horizontal; bei vielen Turbinenantrieben ist allerdings der rotierende Teil direkt auf die vertikale Turbinenwelle gekeilt, falls nicht Kegelräder Verwendung finden.

2. Beispiele von Wechselstrommaschinen.

Zur Erläuterung der besprochenen Einteilung und der daran angeschlossenen Tabelle seien noch verschiedene Maschinentypen an Hand der Fig. 17—32 besprochen: §9. Beispiele von Aussen- u. Innenpolmaschinen.

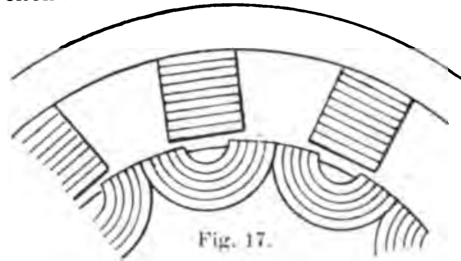


Fig. 17.

Fig. 17 zeigt eine vielpolige Aussenpolmaschine, wobei jeder Pol seine besondere Erregerwicklung trägt. Der induzierte Teil, welcher rotiert,

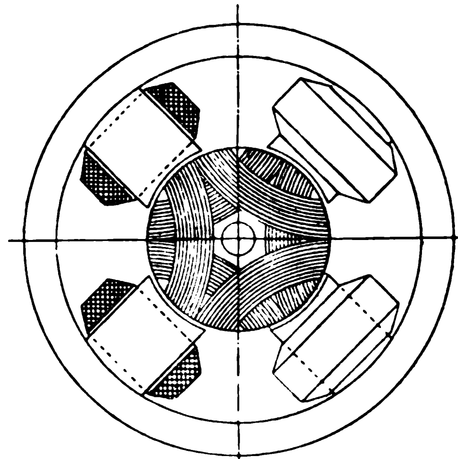


Fig. 18.

während das Magnetgestell feststeht, trägt eine einphasige Trommelwicklung, die aus nebeneinander gelegten Spulen besteht (Spulenanker). Eine vier-

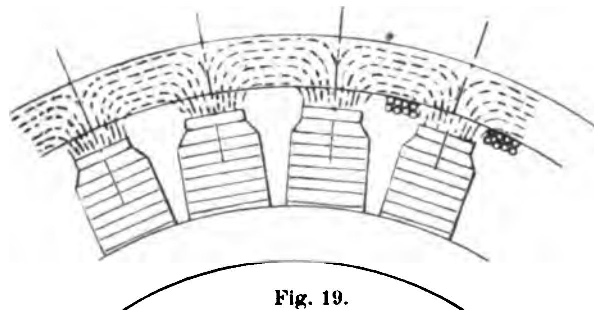


Fig. 19.

polige Aussenpolmaschine[1]) mit übergreifender Dreiphasenwicklung, ist in Fig. 18 dargestellt. Es ist ebenfalls ein Spulenanker. Fig. 19 zeigt eine

1) Nach FISCHER-HINNEN E. T. Z. 1897.

vielpolige Innenpolmaschine. Die Trommelwicklung liegt auf dem inneren Umfang des induzierten Ringes. Die Kraftlinien, die aus dem rotierenden Magnetkranz, dessen Pole sämtlich bewickelt sind, austreten, sind in die Figur eingezeichnet. Die vierpolige Innenpolmaschine[1]) Fig. 20 be-

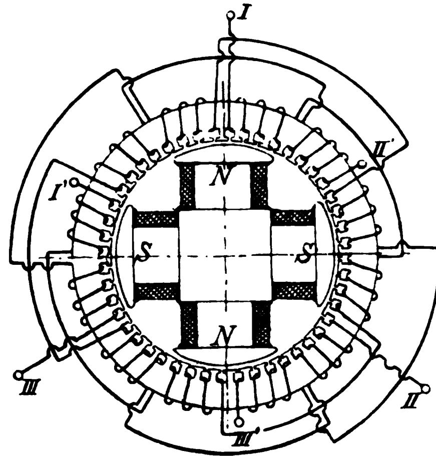


Fig. 20.

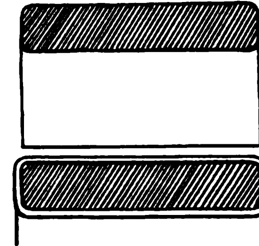


Fig. 21.

sitzt eine stillstehende Ringwicklung für dreiphasige Ströme. Der nach innen liegende Teil der Wicklung ist in halbgeschlossenen Nuten untergebracht. Den Durchschnitt durch eine Aussenpolmaschine mit glattem Ringanker veranschaulicht Fig. 21. Die Maschine Fig. 22 u. 23 hat zur Erregung eine

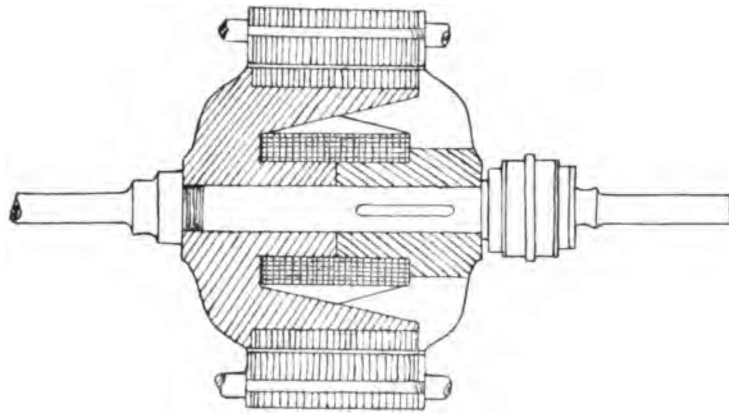


Fig. 22.

gemeinsame grosse Erregerspule. Der von ihr erzeugte Kraftlinienfluss verteilt sich in je vier gleichnamige Polzacken; die ungleichnamigen Pole greifen klauenartig ineinander ein. Der feststehende induzierte Teil der Maschine trägt Ringwicklung mit ebensoviel Spulen als Pole vorhanden sind. Bei der

1) Nach FISCHER-HINNEN E. T. Z. 1897.

Induktionstype (Gleichpoltype) ist es fast allgemein üblich, nur eine gemeinsame Erregerspule zu verwenden. In Fig. 22 sind die beiden Schleifringe für den Erregerstrom eingezeichnet. Fig. 24 u. 25 veranschaulichen

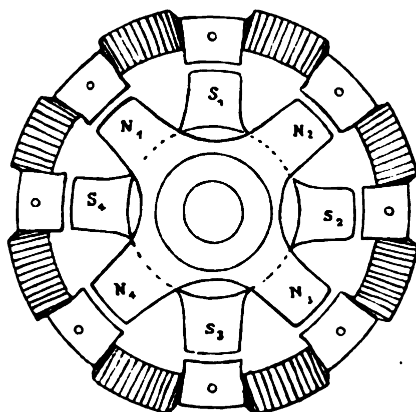
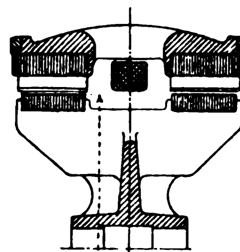


Fig. 23.


Fig. 24.

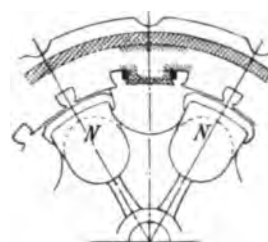
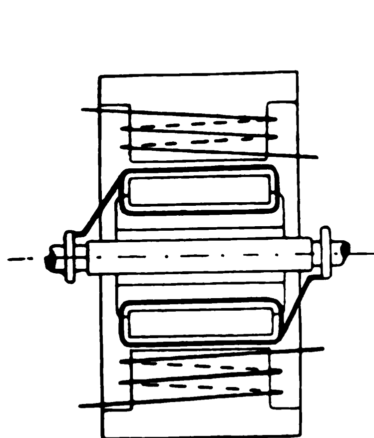
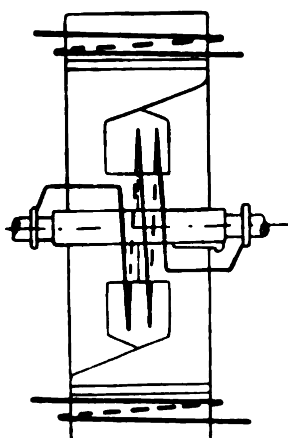
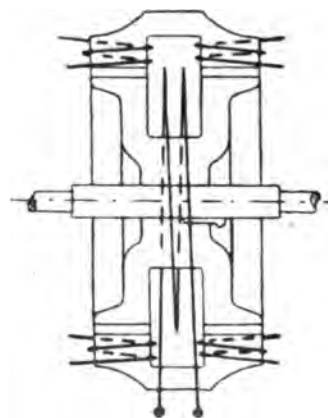


Fig. 25.

eine dreiphasige Induktionstype[1]) mit doppeltem Anker. Die Spulen liegen in halbgeschlossenen Nuten und zwar je zwei Spulenhälften in einer Nute. Der rotierende Teil hat zwei Kränze, je Nord- und Südpole, mit lamellierten


Fig. 26.


Fig. 27.


Fig. 28.

Ansätzen; die gemeinsame Erregerspule steht fest. Sie liegt zwischen den zwei Ankern und ihre Achse fällt mit der Drehachse zusammen.

---

1) Nach FISCHER-HINNEN E. T. Z. 1897.

Die E. A.-G. Schuckert & Co. hat ihre drei Wechselstromtypen[1]) in schematischer Weise durch die Skizzen Fig. 26—28 wiedergegeben. Die erste Figur ist eine Aussenpoltype mit durchweg bewickelten Polen, sie hat rotierenden Anker mit Ringwicklung, welcher der Wechselstrom durch zwei Schleifringe am linken und rechten Ankerende entnommen wird. Die zweite

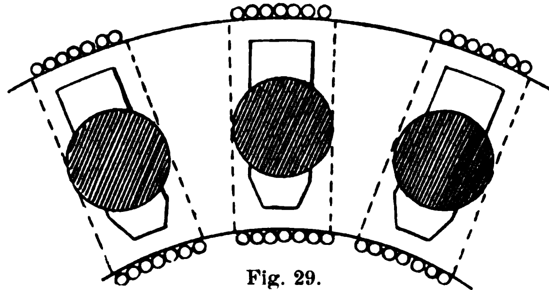


Fig. 29.

Type hat ein innerhalb der induzierten Wicklung rotierendes Schenkelkreuz mit abwechselnden Nord- und Südpolen und gemeinsamer grosser Erregerspule, welcher der erregende Gleichstrom durch zwei Schleifringe zugeführt wird. Die letzte der drei Figuren gehört der Gleichpoltype an, die aussenliegende induzierte Wicklung, die aus zwei Hälften besteht, ebenso wie die

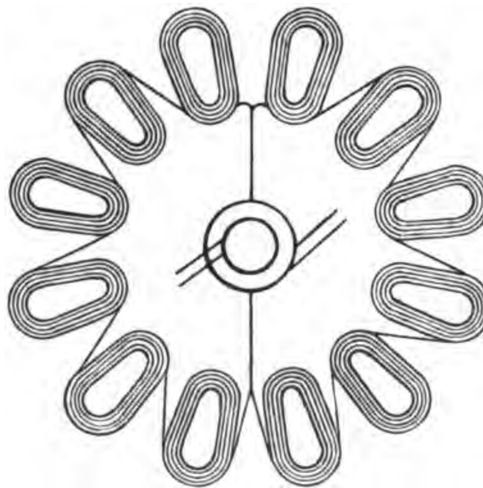


Fig. 30.

grosse Erregerspule stehen fest, es rotiert nur ein mit doppelter Zackenreihe versehenes Polrad. Die Zacken der beiden Räderkränze können entweder in einer Linie oder versetzt stehen. Schleifringe sind jedenfalls bei der letzten Type nicht erforderlich.

§ 10. Flachring-, Scheiben- und Polanker.

Das Bild eines Flachringankers giebt Fig. 29. Die induzierte Wicklung besteht aus vielen einzelnen Spulen, die auf eine lamellierte Eisenscheibe ge-

1) Die Firma baut allerdings auch Innenpolmaschinen, deren sämtliche Pole bewickelt sind.

wickelt sind; die zu beiden Seiten stehenden runden Pole haben längliche Polschuhe. Die Form eines früher vielfach ausgeführten Scheibenankers ist in Fig. 30 niedergelegt. Die Spulen haben länglich-ovale Form und sind in zwei Gruppen hintereinander geschaltet. Die Magnete stehen gerade wie bei Flachringankern zu beiden Seiten der Spulen in achsialer Richtung. Scheibenanker haben gewöhnlich kein Eisen in den Spulen, da die Spulendicke verhältnismässig gering ist. Ein sogenannter Pol- oder Zackenanker hat das in Fig. 31 skizzierte Aussehen, die Ankerspulen sind sämtlich auf einen aussen liegenden Kranz von nach innen vorspringenden Ansätzen gewickelt, denen eine gleiche Anzahl abwechselnder Pole gegenübersteht, die durch Gleichstrom erregt werden. Die skizzierte Maschine ist einphasig und hat rotierende Innenpole.

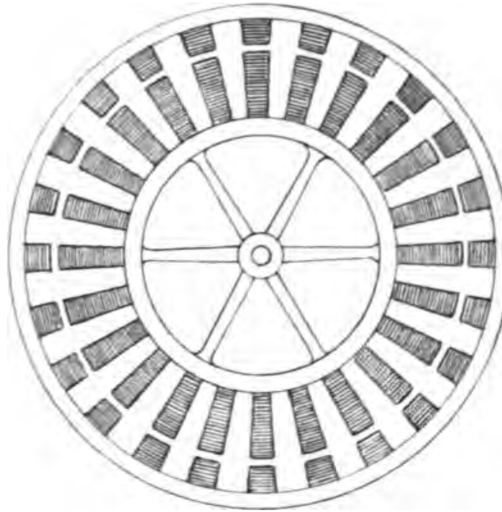


Fig. 31.

§ 11. Oscillator von Tesla.

Als einziges Beispiel einer Maschine mit nicht rotierender, sondern hin- und hergehender Bewegung ist in Fig. 32 der Oscillator von N. Tesla skizziert. Ein Eisencylinder wird direkt von einem Dampfkolben in rasche Hin- und Herbewegung versetzt. Er verändert den magnetischen Widerstand eines durch die Spulen *a a* erregten Kreises, wodurch in den Spulen *b* Wechselströme induziert werden.

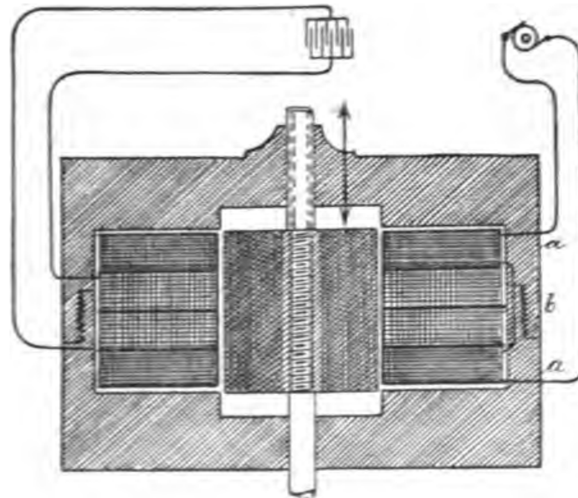


Fig. 32.

3. Vor- und Nachteile der Wechselstrommaschinen.

Obwohl die Erzeugung von Wechselstrom in einer Dynamomaschine das Näherliegende ist — bekanntlich erzeugen alle Gleichstrommaschinen zunächst Wechselströme, — so zeigten die Wechselstrommaschinen namentlich früher und zeigen jetzt noch bis zu einer gewissen Grenze Nachteile, sodass sie nie die Gleichstrommaschinen ganz verdrängen werden.

§ 12. Nachteile des Wechselstromes. Vor der Entdeckung der Mehrphasenströme durch FERRARIS & TESLA war der Haupteinwand gegen Wechselstromverteilung der, dass es keine befriedigenden Wechselstrommotoren gab. Die früheren Wechselstrommotoren hatten fast durchweg schlechten Wirkungsgrad und grosse Erwärmung; das Hauptverwendungsgebiet der Wechselstrommaschinen lag in der Beleuchtung durch JABLOCHKOFF-Kerzen und durch Scheinwerfer auf Leuchttürmen. Zu Anfang der Verwendung von Transformatoren war der Wirkungsgrad des Netzes der grossen Leerlaufverluste der Transformatoren halber gering und auch die Regulierung schlecht. Längere Zeit waren auch die Gleichstrombogenlampen in der Konstruktion denjenigen für Wechselstrom weit überlegen. Nachteile, die der Wechselstromverteilung noch heute anhaften, sind, dass durch Wechselstrom nur in beschränktem Masse chemische Wirkungen hervorgebracht werden können, und dass deswegen der Wechselstrom nicht in Accumulatoren aufgespeichert werden kann. Der Wechselstromlichtbogen ist wesentlich weniger ökonomisch als der Gleichstromlichtbogen. Bei gleicher Lichtstärke braucht die Wechselstrombogenlampe einen grösseren effektiven Strom als die Gleichstromlampe. Wechselströme beeinflussen Telephon- und Telegraphenleitungen stärker als Gleichstrom. Die Erdung einer Wechselstromleitung, auch von sogenannten neutralen Punkten oder Mittelleitern ist deshalb zu vermeiden.

Die Kapazität und Selbstinduktion der Stromerzeuger und -verbraucher sowie der Leitungen, ferner der sogenannte Oberflächen(skin)effekt sind unangenehme Beigaben in allen Wechselstromnetzen, da sie besondere Spannungsabfälle, sogenannte wattlose Ströme und eine schlechte Ausnützung der verwendeten Materialien bedingen; besonders bedeuten die wattlosen Ströme eine recht wesentliche Vergrösserung und Verteuerung der Wechselstrommaschinen, sofern man die Ankerrückwirkung in annehmbaren Grenzen halten will. Wenn auch die asynchronen Mehrphasenmotoren zu einer bewundernswerten Vollkommenheit sich entwickelt haben, so haftet ihnen doch immer noch ein $\cos\varphi$ von 0,85 bis höchstens 0,95 an und die Wechselstromgeneratoren müssen dementsprechend um 15 — 5 Proc. grösser gehalten werden als bei $\cos\varphi = 1$. Die Fähigkeit einer bequemen Tourenregulierung ist bei Gleichstrommotoren viel ausgesprochener vorhanden als bei Wechselstrom. Eine weitere Schwierigkeit, die sich bei Wechselstrombetrieben einstellt, ist das Parallelschalten der Generatoren, wobei z. B. die Maschinen absolut synchron laufen müssen; ein Hintereinanderschalten von Wechselstromerzeugern ist im allgemeinen nicht möglich, während bei Gleichstrom diese Schaltung namentlich in Mehrleiteranlagen von grosser praktischer Bedeutung geworden ist.

§ 13. Vorteile des Wechselstromes. Die Vorteile der Wechselströme sind jedoch andererseits besonders für die elektrische Kraftübertragung von umwälzender Bedeutung geworden. Für Übertragungen auf grosse Entfernungen ist die Verwendung hoher Spannung

Bedingung für die Rentabilität. Während die höchste in Gleichstromapparaten zu erzeugende Spannung 2000—4000 Volt ist, — eine Hintereinanderschaltung von Gleichstrommaschinen zur Erhöhung der Spannung ist ja allerdings möglich, aber beschränkt in der Anwendung; die bekannten Übertragungen der Compagnie de l'Industrie Electrique in Genf beweisen dies —, ist wegen der leichten Transformationsfähigkeit der Wechselströme die Höhe der Wechselspannungen unbeschränkt. Schon in den Wechselstrommaschinen selber lassen sich von einer gewissen Grösse ab Spannungen von 15—20 000 Volt erzeugen, da die einzelnen Spulen leichter und gründlicher isoliert werden können als bei Gleichstrom, sich ferner feststehend und luftig unterbringen lassen, und derart ein Durchschlagen wirksam verhindert werden kann. Vor allem besitzt jedoch die Wechselstrommaschine keinen Kommutator, der bei hohen Spannungen leicht Ursache zu Funkenbildung und zum Überschlagen der Spannung wird.

Durch Zwischenschaltung von einfachen ruhenden Transformatoren lassen sich Wechselspannungen bis 100 000 Volt erzielen, obwohl für den praktischen Gebrauch gegenwärtig Spannungen über 40 000 kaum erforderlich sein dürften. Aber auch zur Erzeugung sehr grosser Stromstärken bei niederer Spannung, wie dies namentlich in Carbidfabriken notwendig wird, bietet der Wechselstrom anerkanntermassen beträchtliche Vorteile, indem bei Gleichstrommaschinen in solchem Falle für die starke Stromentnahme umfangreiche und teure Collectoren notwendig werden, die leicht zu Erwärmung und Funkenbildung Veranlassung geben; allerdings bleiben die hohen Wechselstromstärken auf Wärmewirkungen beschränkt; elektrolytische Wirkungen sind bis jetzt ausgeschlossen. — Ein nennenswerter Vorteil der Drehstromübertragungen gegenüber Gleichstrom ist der, dass bei $\cos \varphi = 1$ nur etwa 75 Proc. des Kupfers für Leitungen erforderlich ist, gleichen Wattverlust in den Leitungen vorausgesetzt. In Anlagen, wo Funkenbildung ausgeschlossen sein soll, sind Drehstrommotoren die einzig entsprechenden Motoren.

4. Historisches.[1]

§ 14. Wechselstrommaschinen aus der Zeit 1831 bis gegen 1850.

An den Entdecker der magneto-elektrischen Induktion (1831), an FARADAY knüpft sich auch die Erfindung der Wechselstrommaschine (Exp. Researches Bd. 3, Art. 31, 92), indem die durch Induktion erzeugten Ströme meist an sich oscillierender oder periodischer Natur sind, im Gegensatz zu den schon früher bekannten, durch galvanische Elemente erzeugten Ströme. Die nächstliegende Wechselstrommaschine war eine rechteckige Spule, die im Erdfeld gedreht wird.

Die erste bekannt gewordene magneto-elektrische Wechselstrommaschine wurde im Jahre 1832 von PIXII[2]) erbaut. Dieselbe bestand nach Fig. 33 aus einem permanenten Doppelmagneten, der um eine vertikale Achse rotiert, und einem System von zwei Spulen, die dem Magnet gegenüberstehen und die auf einen hufeisenförmigen Weicheisenkern gewickelt sind (Scheibenanker). Der rotierende Magnet ist aus verschiedenen Lamellen zusammengesetzt.

1) Für dieses Kapitel ist vieles Material dem „Handbuch von E. KITTLER“ sowie „THOMPSON, Die Dynamo-elektrische Maschine“ entlehnt.

2) Ann. Chim. Phys. Bd. 50, S. 322. 1832.

Im gleichen Jahre baute DAL NEGRO[1]) einen schwingenden Apparat zur Erzeugung von Wechselstrom. Auch GAUSS & W. WEBER konstruierten eine nicht rotierende Maschine zur Erzeugung von Wechselstrom. Sie ordneten zwei Ringmagnete übereinander an, sodass die gleichnamigen Pole einander zugekehrt waren und hoben und senkten dieselben mittelst eines Trittes in einer Induktionsspule, wodurch Induktionsströme erzeugt wurden.

Im Jahre 1833 bezw. 1836 gaben SAXTON[2]) (Cambridge) & CLARKE[3]) der Maschine von PIXII dadurch eine praktischere Form, dass sie die Spulen vor den Magneten rotieren liessen (Fig. 34). Die Achse läuft horizontal. Während in der angedeuteten Maschine von CLARKE die Spulen vor den Seitenflächen des permanenten Magneten rotieren, drehen sich die zwei Spulen der SAXTON'schen Maschinen vor den Stirnflächen des Hufeisenmagneten. Die Maschine von PIXII erfordert keine bewegliche Stromabnahmevorrichtung, da die induzierten Spulen feststehen. SAXTON ordnete an seiner Maschine eine ganz eigenartige Konstruktion zur Stromabnahme an: Es tauchen umlaufende Metallscheiben in Quecksilbernäpfe, von denen die Fernleitungen ausgehen. VON ETTINGHAUSEN[4]) brachte an den bereits erwähnten Maschinen 1838 zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit verbreiterte Polschuhe an. RITCHIE[5]) 1837, BAGE[6]) 1839 und DUJARDIN[7]) 1844 wickeln die Induktionsspiralen direkt auf die Stahlmagnetschenkel und lassen vor den Polen einen Anker aus weichem Eisen rotieren, der meist unbewickelt ist, aber auch Spulen tragen kann. Es war damit die Grundform der sogenannten Induktortype gegeben. PETRINA baute 1845 die erste vierpolige Maschine.

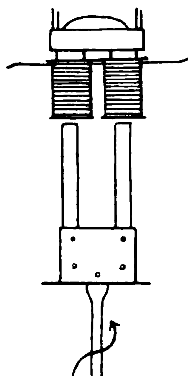


Fig. 33.

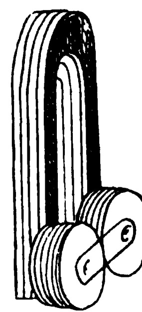


Fig. 34.

Viel benutzt wurden die Wechselstrommaschinen von STÖHRER[8]); die älteren seiner Maschinen glichen denjenigen von SAXTON. Die induzierten Spulen sind auf zwei ausgehöhlten Eisencylindern, die aufgeschlitzt sind, oder auf Eisendrahtbündel gewickelt, die Spiralen auf diesen Kernen sind mit einem Pachytrop genannten Umschalter verbunden, sodass sie zur Variation der Klemmenspannung parallel oder hintereinander geschaltet werden können. Die Spulen sind samt ihren Kernen so montiert, dass sie zur Verringerung des Luftzwischenraums und zur Verstärkung des Magnetfeldes den Magneten genähert werden können. Die spätere Konstruktion von STÖHRER (1844) bestand aus drei aufrechten Hufeisenmagneten mit je fünf Lamellen, die im Kreise angeordnet waren. Über den sechs Polflächen rotiert die Armatur, ein Eisenring mit sechs angeschraubten Kernen, 4,4 cm lang und 2,9 cm dick. Die Spulen wickelt er auf Holzrollen, die über die Kerne geschoben

1) Phil. Mag., Ser. 3, Bd. 1, S. 45. 1832.
2) Phil. Mag., Ser. 3, Bd. 9, S. 360. 1836.
3) Phil. Mag., Ser. 3, Bd. 9, S. 262. 1836.
4) GEHLER's Phys. Wörterb., Bd. 9, S. 122. 1838.
5) Phil. Mag., Ser. 3, Bd. 10, S. 280. 1837.
6) Ann. of Electric., S. 489. 1839.
7) Compt. Rend., Bd. 18, S. 837. 1844.
8) Pogg. Ann., Bd. 61, S. 417. 1844; Bd. 77, S. 467. 1849.

werden. Der verwendete Draht hat eine Dicke von 1 mm, die zwölf Drahtenden führen zu einem Pachytrop, der gestattet, alle Spulen parallel, drei Gruppen à 2, zwei Gruppen à 3 und alles hintereinander zu schalten. NIAUDET verwendete in ähnlicher Anordnung statt drei Hufeisenmagneten deren vier.

WHEATSTONE & COOKE[1]) ersetzten im Jahre 1845 die permanenten Magnete durch Elektromagnete und J. BRETT benützte im Jahre 1848 den Ankerstrom selbst zur Verstärkung der Magnete. HJORTH[2]) kombinierte Dauermagnete, die er nur bei der Inbetriebsetzung jeweils benutzt, mit Elektromagneten für den Dauerbetrieb.

RITCHIE wendete 1849 hohle Kerne und PULVERMACHER solche aus dünnen Eisenblättern an. SINSTEDEN[3]) stellte 1854 (Fig. 35) die Drehachse vertikal und lässt die Spulen zwischen den Schenkeln zweier Hufeisenmagnete rotieren. Statt massiver Eisenkerne verwendet er dünnen Eisendraht oder Blätter. Er will damit die Extraströme vermindern und die Änderung des magnetischen Moments beschleunigen. Die Drahtbündel sind je $8^3/_4$ cm lang, $3^1/_2$ cm dick und 750 g schwer. Jede Spule hat 1 kg Kupferdraht und 840 Windungen. Jeder Magnet wiegt 9 kg und hat einen Querschnitt von $9 \times 5^1/_2$ cm. SINDSTEDEN

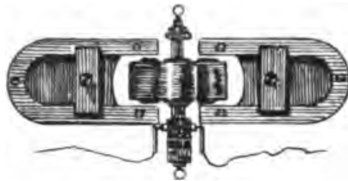


Fig. 35.

bestimmte auch die zweckmässigste Grösse der Polflächen und brachte zwischen den Magnetpolen zur Verhinderung der Änderung der Stärke derselben einen gewissen Eisenschluss an.

An fast allen genannten Generatoren wurde zur Gleichrichtung der Wechselströme, die ja in allen Gleichstrommaschinen mit Ausnahme der FARDAY'schen Scheibe das ursprünglichere sind, noch ein zweiteiliger Kommutator angebracht, um einen mit der Voltasäule gleichartigen Strom zu bekommen. Die Entwicklung der Dynamomaschine bis in die achtziger Jahre des 19. Jahrhunderts hinein bezieht sich deswegen im wesentlichen auf Gleichstrommaschinen.

Der erste Wechselstromgenerator, der in der Industrie nennenswerte Verwendung fand, ist die von der Gesellschaft Alliance gebaute Type, die schon im Jahre 1849 von NOLLET[4]) (Professor der Physik an der Kriegsschule Brüssel) angeregt und von HOLMES, VAN MALDERON, MASSON und DU MONCEL ausgearbeitet wurde. Sie gleicht (Fig. 36) der CLARKE'schen Maschine, besitzt jedoch eine grosse Zahl (zweimal acht) Hufeisenmagnete. Die sechzehn Armaturspulen sind in Vertiefungen eines Bronzerades untergebracht und rotieren zwischen der doppelten Magnetreihe. Die Wicklung der Spulen liegt § 15. Alliance-maschine.

1) Engl. Patent [1845] No. 10655.
2) Pogg. Ann., Bd. 84, S. 186, 1851; Bd. 92, S. 222, 1854.
3) Engl. Patent [1848] 12295; [1855] 806.
4) Engl. Patent [1850] 13302.

auf zwei ineinandergesteckten hohlen Eisenblechkernen (Fig. 37), die in der Längsrichtung gespalten sind und besteht aus einer achtfachen Kupferlitze, deren einzelne Drähte von einander isoliert sind.

Das üblichste Modell der Alliancemaschinen bestand aus fünf aneinandergereihten Magnetkränzen, zwischen denen vier Spulscheiben rotierten. Ein grösseres Modell hatte sogar sechs Scheiben und sieben Magnetkränze. Eine Stromabnahme bildete die Maschinenachse oder das damit in Verbindung stehende Gestell; das andere Drahtende führte zu einer isolierten Metallhülse, von der eine Schleiffeder den Strom abnahm. Die Maschinen machten 400 Touren, erzeugten also fünfzig Perioden. Die Hufeisenmagnete aus fünf bis sechs Lamellen von 1 cm Dicke wogen je 20 kg und waren mit Polschuhen aus weichem Eisen versehen. Die induzierten Spulen waren 10 cm lang und 4 cm dick. Die Endscheiben aus Messing waren geschlitzt. Als Isoliermaterial für die Drahtbewicklung kam Leinwand in Anwendung, die in einer Lösung von Asphalt, in Terpentin oder Benzin getränkt wurden. Die ursprüngliche Absicht beim Bau der Alliancemaschine war, den ihr entnommenen gleichgerichteten Strom zur Zersetzung von Wasser zu benützen und den Wasserstoff zur öffentlichen Beleuchtung zu verwenden. Die Maschinen wurden jedoch fast ausschliesslich ohne Kommutator für die elektrische Beleuchtung von Leuchttürmen in Frankreich und England benützt. Auch auf Seeschiffen, Bauplätzen und Werften verschaffte sich die Alliancemaschine Eingang. Die im Jahre 1863 auf dem Leuchtturm La Hève aufgestellte Maschine speiste eine Bogenlampe von 1900 Normalkerzen und zwar bei 100 sekundlichen Polwechseln. Die Alliancemaschine ist jetzt noch auf einzelnen Leuchttürmen in Betrieb.

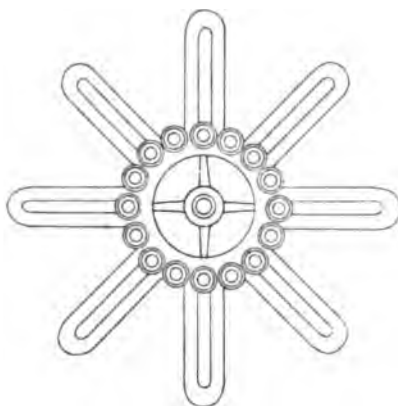
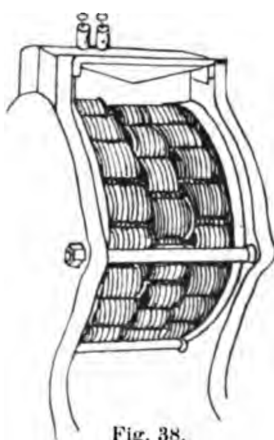
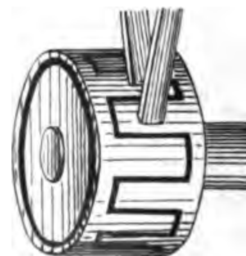

Fig. 36.


Fig. 37.


Fig. 38.


Fig. 39.

Da die Maschine jedoch zu teuer ausfiel, baute dieselbe Gesellschaft vom Jahr 1867 ab die Wechselstrommaschine von Wilde (Fig. 38), worin die permanenten Magnete durch Elektromagnete ersetzt sind. Zwischen zwei Reihen von Elektromagneten von entgegengesetzter Polarität rotiert eine gleiche Anzahl Armaturspulen mit Eisenkernen. Die Maschine war selbsterregend (1873); der remanente Magnetismus erzeugt zunächst die Anfangsspannung und dann liefern einige Spulen Strom an einen Kommutator zur Speisung der Elektromagnete, während der Hauptstrom über zwei Schleif-

ringe nach aussen geführt wird. Der Kommutator (Fig. 39) setzt sich aus zwei gezahnten isolierten Metallröhren zusammen, die ineinander geschoben sind; die zwei Bürsten für den gleichgerichteten Strom stehen um eine Zahnbreite von einander ab. Anfang und Ende der induzierten Spulen, die den Erregerstrom liefern, sind mit je einer der beiden Röhrenhälften verbunden. Die Maschine hat ebenfalls für Leuchttürme Verwendung gefunden, erwies sich jedoch für anhaltenden Dauerbetrieb als nicht geeignet, da sie zu heiss wurde.

Wie schon erwähnt, baute HOLMES die Alliancetype in England, allerdings mit nach aussen gekehrten Magneten (Fig. 40). FARADAY spendete 1857 dieser Maschine grosses Lob. HOLMES brachte zum Beispiel 160 Spulen auf Rädern von 2,74 m Durchmesser unter, wobei er sechzig Hufeisenmagnete in drei Reihen verwendete. Später wurden die Magnete vor den feststehenden Spulen vorbeigeführt. Im Jahre 1869 ersetzte HOLMES die permanenten Magnete durch hufeisenförmige Elektromagnete.

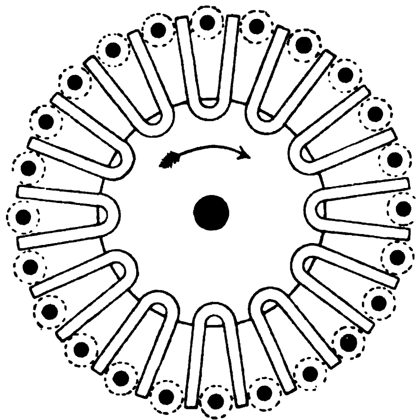


Fig. 40.

In das Jahr 1856 fällt die Entdeckung des Doppel-T-Ankers von WERNER VON SIEMENS, die jedenfalls den bis dahin üblichen Scheibenankern gegenüber einen wesentlichen Fortschritt bedeutete. Im Jahre 1859 wurde die Wicklung dieser Maschine in Rinnen der Magnete untergebracht und nur das Eisen gedreht. § 16. Doppel-T-Anker. Jablochkoff-Kerzen.

Auf der Wiener Ausstellung im Jahre 1873 waren verschiedene Wechselstrommaschinen ausgestellt; aber sie waren von weit geringerem Interesse als die ausgestellten Gleichstrommaschinen von PACINOTTI, GRAMME und SIEMENS.

Obwohl Wechselströme von vornherein für hintereinander geschaltete Bogenlampen Verwendung gefunden hatten, bedeutete die ins Jahr 1876 fallende Erfindung der elektrischen JABLOCHKOFF-Kerzen für die Wechselstrommaschinen einen nennenswerten Aufschwung. Diese Kerze ist nämlich an sich sehr einfach, sie kann aber nur mit Wechselstrom gespeist werden, da bei Gleichstrom die positive Kohle doppelt so rasch abbrennt als die negative und der Lichtbogen dabei rasch erlischt.

GRAMME baute im Jahre 1877 zur Speisung von JABLOCHKOFF-Kerzen seine Wechselstrommaschine mit Ringwicklung. Sie besteht aus einem Ring § 17. Gramme-Maschine.

von weichem Eisen, wovon je ein Achtel in gleichem Sinne vollgewickelt ist. Die einzelnen Wicklungsabteile laufen abwechselnd links und rechts. Ein achtteiliger Polstern mit alternierenden Nord- und Südpolen rotiert innerhalb des Kernes. Die Pole tragen abgerundete Polschuhe. Die Erregung erfolgt durch eine besondere Gleichstrommaschine über zwei Schleifringe weg. Die

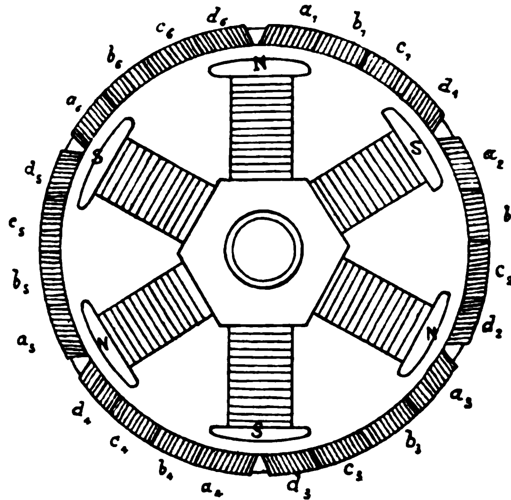


Fig. 41.

Fig. 41 zeigt eine sechspolige GRAMME'sche Ringmaschine mit sechsmal vier Armaturspulen, welche zugleich die erste Mehrphasenmaschine darstellt. Die Spulen mit dem Index 1, 3, 5 sind gleichsinnig gewickelt; diejenigen mit dem Index 2, 4, 6 haben umgekehrten Wickelsinn; die Spulen a_1, a_2, a_3,

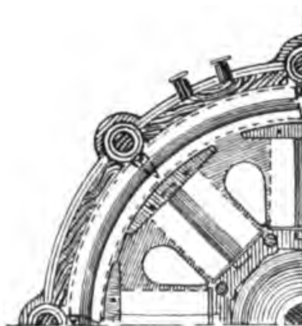


Fig. 42.

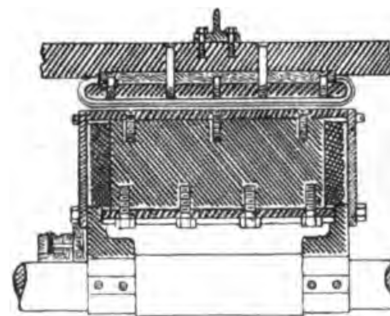


Fig. 43.

a_4, a_5, a_6 sind sämtlich in richtiger Weise hintereinander geschaltet und bilden eine Phase. In gleicher Weise sind die drei übrigen Phasen verbunden, jede Phase dient, unabhängig von den anderen, zur Speisung von JABLOCHKOFF-Kerzen. Indess war für GRAMME die Phasenverschiebung der verschiedenen Zweige von keiner besonderen Bedeutung und das Mehrphasenstromsystem liess noch einige Jahre auf sich warten.

Im Jahre 1879 kombinierte Gramme seine Gleichstrommaschine (Aussenpoltype) mit der eben besprochenen Wechselstrommaschine in einem Gestell: Fig. 42 u. 44, die hintereinander montiert zu denken sind. Der Gleich-

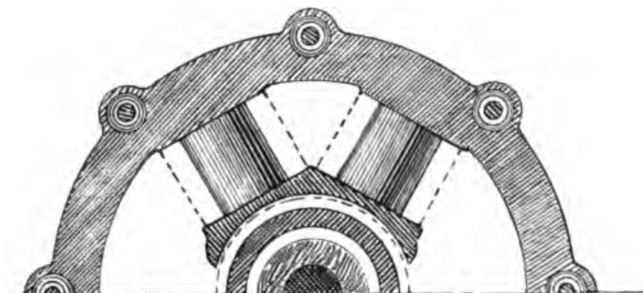


Fig. 44.

stromteil hat zwei Doppelpole (Fig. 44), die Wechselstrommaschine ist achtpolig (Fig. 42). Fig. 43 giebt einen Durchschnitt durch die Wechselstrommaschine.

Im Jahre 1878 baute die Firma Siemens & Halske eine Wechselstrommaschine (Fig. 45 u. 46) mit rotierendem Scheibenanker, die derjenigen von § 18. Wechselstrommaschinen von Siemens & Halske.

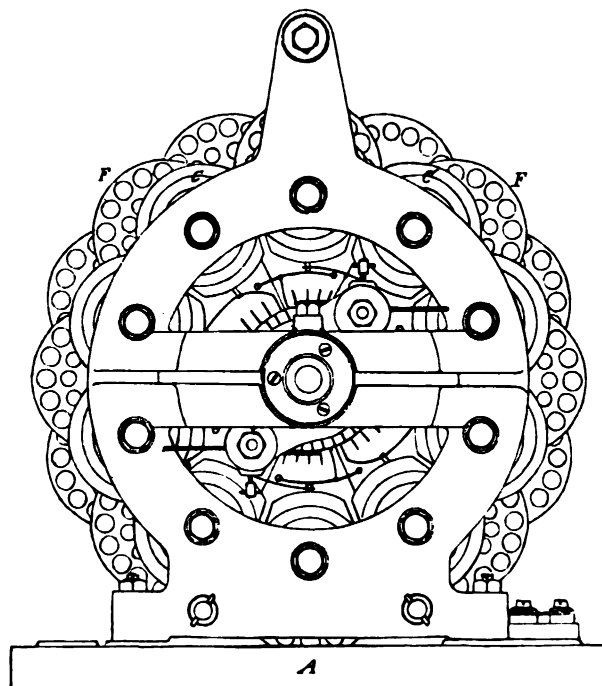


Fig. 45.

Wilde sehr gleicht. Sie hat Polschuhe (*S* u. *N*) und gewöhnlich eine besondere Erregermaschine, da die eigene Erregung (Fig. 46) bei Belastungsänderungen sich als zu empfindlich erwies. Die Maschine hat in den Jahren 1878 — 1882 sehr grosse Verbreitung gefunden. Die länglichen, induzierten Spulen *F* (Fig. 45, 46 u. 47) sind ziemlich platt und auf Holzkerne

gewickelt und bestehen aus isoliertem Kupferband oder -draht. Die Spannungskurve der Maschine ist ziemlich sinusförmig. Sie wurden für Leistungen von 3000—16000 Watt gebaut, die Tourenzahl der kleineren Maschine war 750, diejenige der grösseren 500; die zugehörigen Maschinengewichte betragen 275 kg und 990 kg.

Das D. R. P. No. 3383 vom Jahre 1878 enthält die Beschreibung einer Wechselstrommaschine mit Trommelanker der Firma SIEMENS & HALSKE. Die Maschine hat ein doppeltes magnetisches Feld (Fig. 48) und gehört also der Innen- und Aussenpoltype an. Die gegenüberliegenden Pole sind ungleichnamig. Der Anker besteht aus einem Holzcylinder mit einer Reihe von Vor-

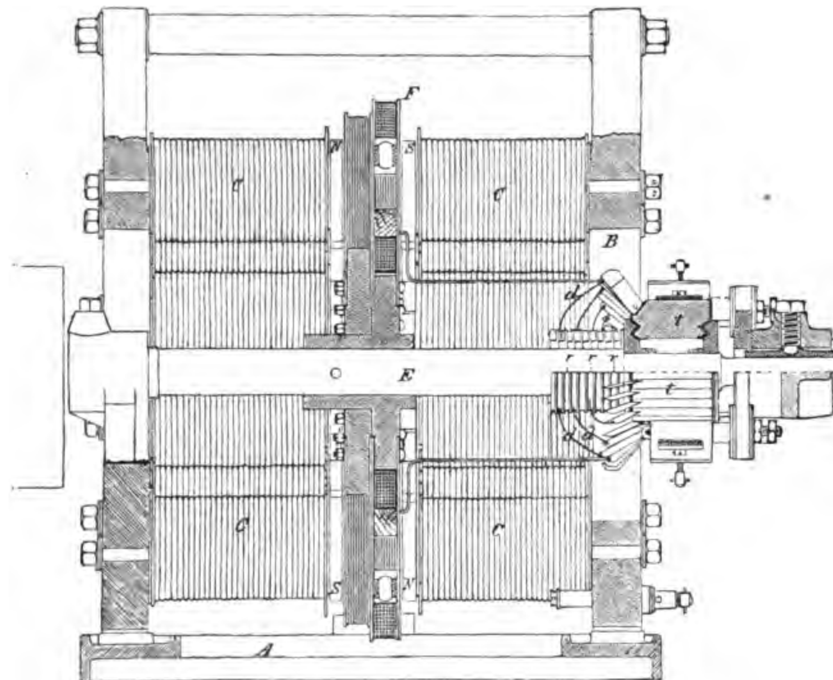


Fig. 46.

sprüngen, um welche die Spulen gewickelt sind. Es wird noch angegeben, dass es gleichgültig ist, ob der Anker rotiert, wie in der Skizze, oder ob das Feld rotiert. Die Firma hat auch thatsächlich die Maschine später ausschliesslich als Innenpolmaschine mit rotierendem Schenkelkreuz ausgeführt. Im Jahre darauf liess sich die Firma SCHUCKERT & Co. eine ganz ähnliche Maschine patentieren, nur mit dem Unterschiede, dass keine geschlossenen Spulen, sondern eine in Schlangenlinien verlaufende Wicklung verwendet wird.

§ 19. De Méritens-Maschine. Die Ringankermaschine von DE MÉRITENS (Fig. 49) stammt aus dem Jahre 1879. Sie besitzt einen achtreihigen Kranz von fünffachen, permanenten Magneten, die wieder aus acht Lamellen bestehen, und gleicht im äusseren Aufbau der Alliancemaschine. Der Ankerkern besteht aus Eisenblechpacketen von der gebogenen Segmentform Fig. 50. Die Bleche, die die Packete bilden, sind 1 mm stark. Es werden immer 50—70 Bleche unter Zwischen-

legung von Isolationsmaterial zu einem Segment vereinigt. Ein rotierendes Bronzerad trägt zwei Zahnreihen, welche die bewickelten Segmente zwischen sich aufnehmen und die Packete an die eine Reihe Bolzen, welche je halb und halb in zwei aufeinanderfolgende Segmente passen, anklemmen (Fig. 51), sodass ein einfacher Spulenersatz möglich wird. Ursprünglich waren die Magnete horizontal angeordnet (Fig. 51), im Jahre 1881 gestaltete sich jedoch der

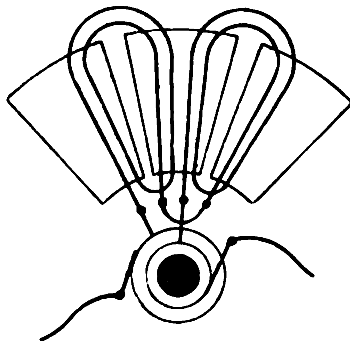


Fig. 47.

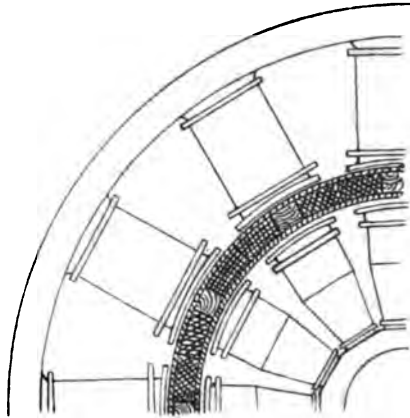


Fig. 48.

Aufbau genau wie in der Alliancemaschine (Fig. 49). Die Magnete sitzen auf Bolzen (Fig. 49), die in Führungsschlitten befestigt sind, sodass der Luftzwischenraum reguliert werden kann. Zur Stromabnahme dienen Schleifringe, die durch Bürsten und Leitungsdrähte mit dem oben auf der Maschine sitzenden Klemmbrett verbunden sind. Der äussere Durchmesser der Maschine ist



Fig. 49.

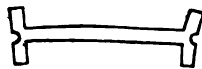


Fig. 50.

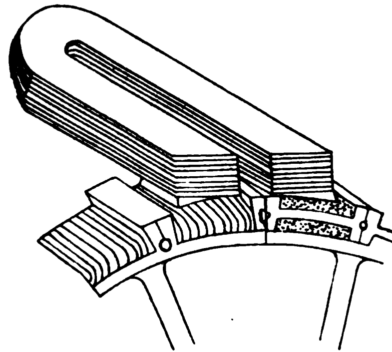


Fig. 51.

130 cm, derjenige der Armatur 42 cm, die Länge beträgt 70 cm. Auf der Pariser Ausstellung 1881 waren sechs Stück dieser Maschinen ausgestellt und fielen dort durch ihre vorzügliche mechanische Ausführung besonders auf, obwohl im übrigen auf dieser Ausstellung die Wechselstrommaschinen immer noch höchstens von wissenschaftlichem Interesse waren und fast ausschliesslich von Mechanikern gebaut wurden. Die grössere Type der Méritensmaschine wurde in ausgedehnter Weise für englische, französische und

russische Leuchttürme, sowie für Zwecke der Küstenbeleuchtung benützt. Die kleinere Type speiste Bogenlampen und JABLOCHKOFF-Kerzen in Werkstätten und Fabrikbetrieben.

§ 20. Maschinen von Wilde, La Chaussée, Chertemps.

WILDE baute im Jahre 1878 eine Wechselstrommaschine mit Aussenpolen und einer rotierenden GRAMME-Armatur. Sie besass zur Erregung einen Kommutator aus zwei ineinander greifenden, gezahnten, isolierten Röhren (Fig. 39), wobei nur eine Armaturspule den Erregerstrom lieferte. Im Jahre 1880 konstruierte BÜRGIN eine Wechselstrommaschine mit derselben Anordnung wie seine bekannte Gleichstrommaschine.[1])

Ums Jahr 1880 verlor die JABLOCHKOFF-Kerze wieder ihr Verwendungsgebiet, indem sie durch verbesserte Gleichstrombogenlampen verdrängt wurde, so dass der Wechselstrom auf gewisse Verteilungen für Glühlicht beschränkt blieb.

La CHAUSSÉE & LAMBOTTE bauten im Jahre 1888 für die Compagnie Générale Belge de Lumière électrique eine Wechselstrommaschine, die derjenigen von SIEMENS & HALSKE mit Scheibenarmatur sehr ähnelt. Es rotieren allerdings die beiden Magnetkränze, während die Armatur feststeht. Die Spulen sind auf hohle Rahmen aus dünnem Eisenblech aufgewickelt. Die Rückplatten der Magnete dienen zugleich als Schwungrad. Die im gleichen Jahre erfundene Maschine von CHERTEMPS stimmt in ihrem äusseren Aufbau völlig mit der eben besprochenen überein. Sie hat eigene Erregung. In fünf Typen leistet die Maschine 0,5—6 KW bei 1275 bezw. 750 Touren. Die Maschine hat bei grossen Änderungen im äusseren Widerstand nahezu konstante Stromstärke. Der gesamte maximale Wirkungsgrad wurde zu 68 Proc. bestimmt.

Die Einführung des Wechselstromtransformators (1882) in die elektrotechnische Praxis bedeutete für die Wechselstromtechnik einen Umschwung und eröffnete den Wechselstrommaschinen ein neues Feld, indem die Anpassungsfähigkeit des Wechselstromsystems zu beliebigen Änderungen der Spannung in einfachen, nicht rotierenden Apparaten für lange Fernübertragungen grosse Vorteile bietet.

§ 21. Maschinen von Ganz & Co.

Die Firma GANZ & Co. in Budapest, die sich seit dem Jahre 1878 mit dem Bau von Wechselstrommaschinen befasste, hatte auf der Wiener Ausstellung 1883 eine ganz ähnliche Maschine ausgestellt wie diejenige von SIEMENS & HALSKE mit Trommelanker (Fig. 48), und zwar eine grosse Dampflichtmaschine: eine vertikale, rasch gehende Hochdruckdampfmaschine war direkt mit der Wechselstrommaschine und der Erregermaschine gekuppelt. Der Anker der Wechselstrommaschine hat 36 aussen liegende Spulen und 36 innen rotierende Magnete. Der Erreger besitzt 12 Innen- und 12 Aussenpole, zwischen denen ein Ring von 1,5 m Durchmesser rotiert. Der Erregerstrom wird dem Kommutator der Erregermaschine entnommen und durch zwei Schleifringe dem Polkranz zugeführt. Die feststehende Trommel kann mittelst verschiedener Schraubenspindeln zur Reparatur über die Pole weggeschoben werden. Die Maschine hatte 180 Umdrehungen und erzeugte 90000 Watt bei 58 Volt Klemmenspannung. Der Wirkungsgrad lag zwischen 80 und 85 Proc.

Die selbsterregende Maschine von GANZ & Co., Patent DÉRI-ZIPERNOWSKY, aus dem Jahre 1882, hat acht rotierende Innenpole mit schmiedeeisernen

1) Siehe z. B. KITTLER, Handbuch der Elektrotechnik. Teil II.

Kernen. Die Armatur ist nicht auf Holz, sondern auf Eisen gewickelt. Die Pole besitzen aufgeschraubte Polschuhe. Die Kerne der Ankerspulen bestehen aus zickzackförmigen, schmiedeeisernen Streifen (Fig. 52). Der Kommutator besitzt doppelt so viele Segmente als Pole, und zwar breite und schmale, die letzteren dienen nur zur Trennung. Alle paarigen Segmente und ebenso alle unpaarigen sind verbunden. Die Erregung wird entweder von der Hauptleitung oder von besonderen Armaturspulen abgenommen. Durch die Eisenkerne in den Spulen (Fig. 52) wurde eine Steigerung der Leistung im Verhältnis 3:5 erzielt. Derartige Maschinen laufen z. B. in der Beleuchtungscentrale in Rom und wurden bis zu einer Leistung von 80 KW bei 2000 Volt und 250 Touren gebaut.

Die auf der ungarischen Landesausstellung zu Budapest zuerst im Jahre 1885 vorgeführte Maschinenform der Firma Ganz & Co. mit Zackenarmatur

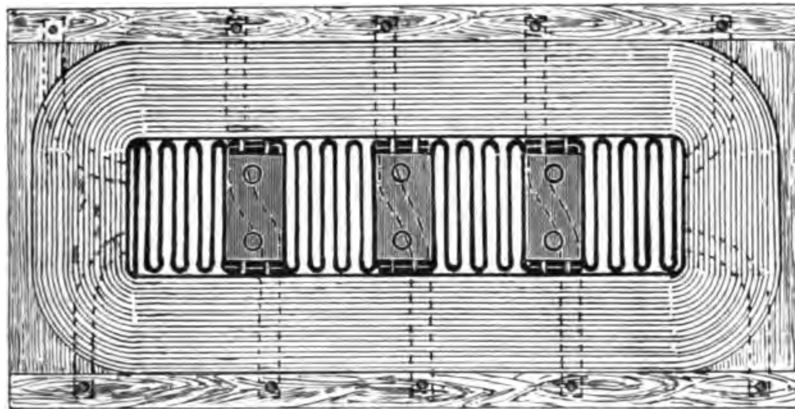


Fig. 52.

wird erst unter dem Abschnitt „Neuere Maschinentypen" aufgeführt werden. Dieselbe hat in Wechselstromcentralen vieler Städte Verwendung gefunden und war wohl die erste Wechselstrommaschine, die für Centralenbetriebe parallel geschaltet wurde. Die Thatsache des Parallelschaltens war schon im Jahre 1868 von Wilde beobachtet und später von Deprez bestätigt worden, und im Jahre 1884 besprach Hopkinson in ausführlicher Weise die Bedingungen, die es ermöglichen, zwei Alternatoren in Synchronismus zu bringen. §. 22. Parallelschalten.

Aus dem Jahre 1883 ist von der Wiener Ausstellung noch die Maschine von Gérard zu erwähnen. Sie gleicht der Type von Wilde, hat jedoch eine doppelte Scheibenarmatur, die feststeht und zwischen der die Elektromagnete rotieren. Auf der Maschine sitzt ein vielteiliges Klemmbrett, das mit den Anfängen und Enden aller Spulen verbunden ist. Die Maschinen wurden für 12, 24, 48 und 96 Bogenlampen konstruiert. § 23. Maschinen von Gérard, Hopkinson.

Die Scheibenarmatur von Hopkinson-Muirhead (Fig. 53) zeigt insofern eine Neuerung, als die Windungen der induzierten Spulen aus zickzackförmigen Kupferstreifen hergestellt sind, welche in die Nuten der aus Bandeisen aufgewickelten Ankerscheibe eingelegt werden. Die Herstellung ist äusserst einfach. Die Bewicklung des Feldes ist ganz ähnlich.

Die beiden Wicklungsarten sind in Fig. 54 u. 55 einander gegenübergestellt: In Fig. 54 sind eine Reihe voller Spulen hintereinander geschaltet und in Fig. 55 besteht die Wicklung aus den erwähnten Schlangenlinien.

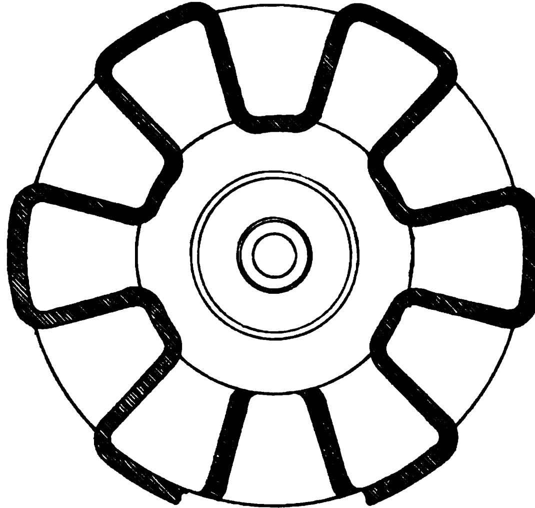


Fig. 53.

§ 24. Ferranti's Maschine. Die erste Maschine von Ferranti, des bekannten Konstrukteurs der Londoner Centralenmaschinen, die er gemeinsam mit W. Thomson und A. Thompson entwarf, lief im Jahre 1883 in der Ausstellung des Aquariums in London. Der Scheibenanker (Fig. 56) besteht aus sinusförmig gebogenen

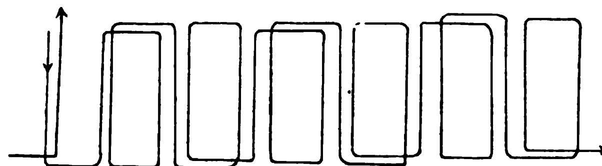


Fig. 54.

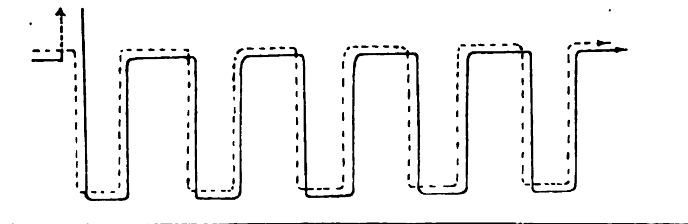


Fig. 55.

Kupferbändern, deren radiale Teile gleichen Abstand wie die auf beiden Seiten liegenden Magnetpole haben. Die Bänder sind durch Kautschukstreifen isoliert. Die zweimal 16 Pole haben ovalen Querschnitt. Die rotierende Armatur enthält kein Eisen und halb so viel Spulen als Pole. Es ist eine besondere Erregermaschine vorgesehen. Der Wechselstrom wird durch zwei

Schleifringe, wovon der eine mit der Achse verbunden ist, abgenommen. Auf diesen Schleifringen gleiten bremsklotzähnliche Stücke, die zur sicheren Anpressung verschiebbar sind. Der mittlere Armaturdurchmesser betrug 38 cm bei 1900 Touren, was einer Umfangsgeschwindigkeit von 38 m entspricht. Sie gab bei 250 Perioden 156 Amp. und 125 Volt und wog samt Erreger 700 kg. Im Jahre 1884 baute FERRANTI eine Maschine für 5000 Glühlampen von je 200 Volt und 0,33 Amp. bei 1000 Touren. An der Peripherie



Fig. 56.

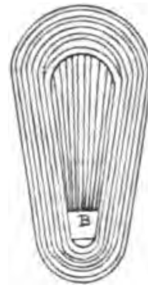


Fig. 57.

einer isolierten Messingscheibe sind acht Stück je 3 cm breite und 1,73 mm dicke Kupferstreifen befestigt und in der in Fig. 56 dargestellten Weise gebogen. Die Maschine besitzt acht parallele Stromkreise, die zu zwei Schleifringen geführt sind. Der äussere Durchmesser ist 91 cm. In der grösseren Type verwendet FERRANTI statt der Elektromagnetspulen 32 Kupferbarren

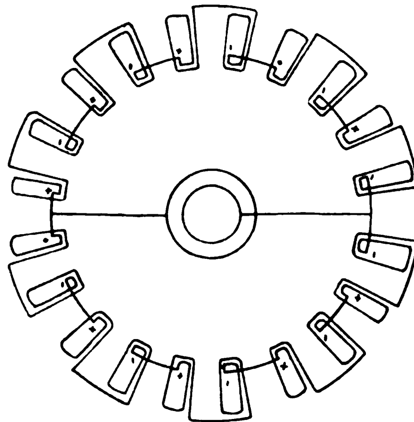


Fig. 58.

von rechteckigem Querschnitt, 19 mm breit und 22 mm dick, welche ähnlich wie die Armaturspulen gebogen sind und unter und über den Kernen abwechselnd verlaufen. Da jedoch bei dieser zickzackförmigen Anordnung ein Isolationsfehler bedingt, dass der ganze Anker ersetzt wird, verwendet FERRANTI im Jahre 1888 wieder einzelne Spulen aus dünnen Kupferbändern (Fig. 57). Eine derartige, für die London Electric Supply Station Corporation gelieferte Maschine ist 8 m hoch, hat einen Ankerdurchmesser von 7,6 m,

260 Touren, 40 Pole auf jeder Seite, 85 Perioden, 210 Amp., 2400 Volt. Der Energieverlust im Anker beträgt nur 1,4 Proc. der Maximalleistung. Die Schaltung ist in Fig. 58 skizziert.

§ 25. Maschinen von Labour, Crompton, Gordon, Matthews.

Die SIEMENS'sche Wechselstrommaschine mit Scheibenanker hat in Frankreich durch LABOUR und in England durch CROMPTON-BRUNTON eine Variante erhalten. Bei ersterer sitzt die Erregermaschine direkt auf der Hauptmaschinenwelle und das Magnetfeld des Erregers, sowie die anschliessende Magnetreihe des Generators können durch Spindeln in der Achsenrichtung verschoben werden, sodass eine leichte Besichtigung möglich ist. Das Magnetsystem der zweitgenannten Maschine ist horizontal geteilt, sodass der obere Teil abgehoben werden kann. Der Luftzwischenraum ist zur Verminderung der Erregung sehr reduziert und der rotierende induzierte Teil sehr leicht gehalten, um die mechanischen Verluste zu verringern.

GORDON vertritt mit seiner Wechselstrommaschine (1882) zuerst das von MARCEL DEPREZ ausgesprochene Prinzip, dass nur unter Verwendung grosser Maschinen der Betrieb elektrischer Centralstationen sich rentabel gestalte. Die eine Type speiste 5000 Stück 20 kerzige Swanlampen, die andere deren 1000. Es rotieren je 32 Elektromagnete, abwechselnd Nord- und Südpole, an zwei

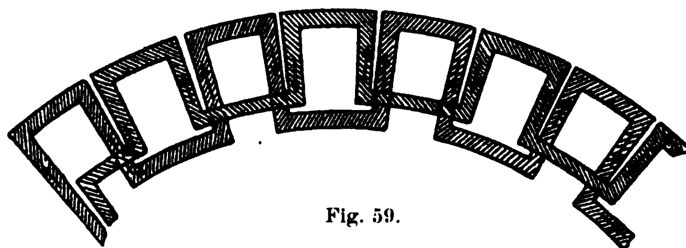


Fig. 59.

Scheiben von 2,67 Durchmesser befestigt. Sie haben schmiedeeiserne Kerne und die zwei Kränze kehren sich keilförmige Polstücke aus Kesselblech zu. Der Erregerdraht ist 4,7 mm stark und der Erregerstrom wird durch Schleifringe zugeführt. Das Magnetrad fasst zwischen sich zwei Reihen feststehender Spulen in Scheibenform; letztere sind länglich flach und enthalten keilförmige Eisenstücke. Diese Eisenkerne sind unter Zwischenlegung eines Holzblockes je auf einen Gussring geschraubt. Die Isolierung soll Energieverluste in den Gussringen vermeiden. Die dem Magnetrad zugekehrte Spulenseite ist mit Neusilberblech bedeckt, in dem Ventilationsnuten ausgespart sind. Jede Armaturscheibe führt zu zwei Klemmen, die beliebig verbunden werden können. Der Luftzwischenraum ist nur 3 mm. Der Ankerdraht ist doppelt mit Baumwolle umsponnen, die Spule je völlig in Schellack getränkt, heiss getrocknet und dann mit Asbestfarbe bestrichen. An jedem Ringe sind doppelt soviel Spulen als Pole, nämlich je 64. Auf jeder Ankerspule liegen 40 m Draht von 4,7 mm Durchmesser. Bei 180 Touren und Parallelschaltung aller Spulen liefert die Maschine 60 Volt und 6000 Amp.; sie wiegt 22 t.

1883 baute GORDON Zweiphasenmaschinen, die andauernd in Betrieb waren. Die zwei Phasen waren unverkettet.

Die Scheibenarmatur von MATTHEWS besteht aus zwei ineinandergreifenden zickzackförmigen Bändern (Fig. 59), welche zwei unabhängige Stromkreise speisen.

Die Wechselstrommaschine von LONTIN[1]) (Fig. 60) aus dem Jahre 1878 besitzt einen radialen rotierenden Magnetkranz und einen aussen liegenden sogenannten Polanker, d. h. einen aussen liegenden Kranz von vorstehenden induzierten Spulen und zwar 24 an der Zahl. Die Verwendung dieser Maschine blieb der starken Erwärmung der Eisenkerne halber beschränkt. § 26. Lontin, Maquaire.

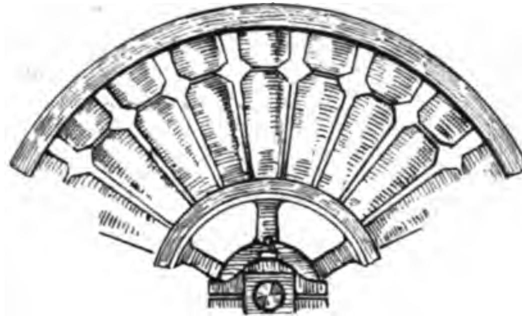


Fig. 60.

Der Franzose MAQUAIRE versuchte in seiner Flachringmaschine (1882) (Fig. 61) die gegenseitige Induktion zweier Stromleiter zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Maschine zu benützen. Sie besteht aus zwei nebeneinanderstillstehenden Flachringen, vor denen ein Magnetsystem rotiert. Die

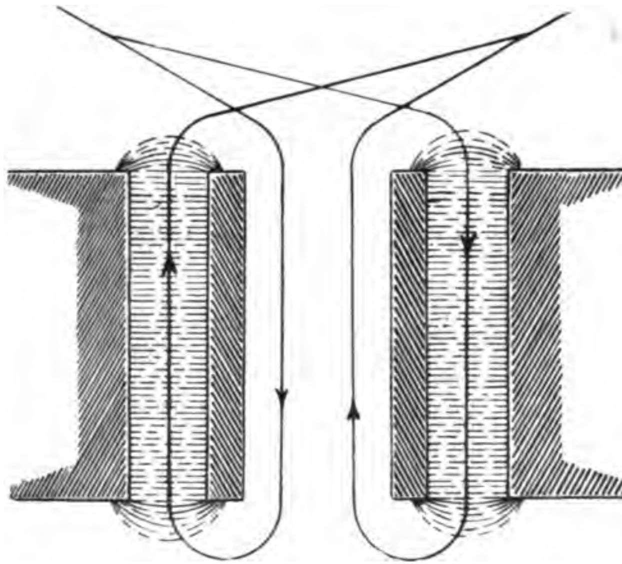


Fig. 61.

beiden Spulen (Fig. 61) werden durch die Magnete, welche sich senkrecht zur Papierebene bewegen, in dem angedeuteten Sinne induziert; gleichzeitig sollen aber auch die periodisch sich ändernden, in den nebeneinander gelegenen inneren Stromelementen fliessenden Ströme gegenseitige elektro-

1) Engl. Patent (1875) No. 473.

motorische Kräfte erzeugen, welche die direkte Induktion unterstützen. Die Maschine hat nur vereinzelt für Soleillampen Verwendung gefunden.

§ 27. Westinghouse Co. Die Wechselstrommaschinen der Westinghouse-Co. in Pittsburg wurden in der Mitte der achtziger Jahre von Stanley besonders zum Betrieb von Transformatorenanlagen konstruiert. Sie besitzen (Fig. 62—66) einen Anker mit Trommelwicklung, der innerhalb eines Kranzes von sechzehn radial gestellten, bewickelten Aussenpolen rotiert (Fig. 62). Die Pole sind aufgeschraubt und die Magnetspulen

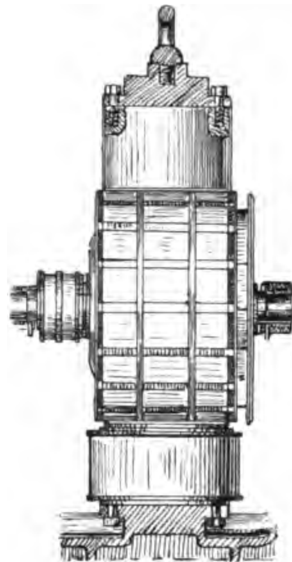


Fig. 62.

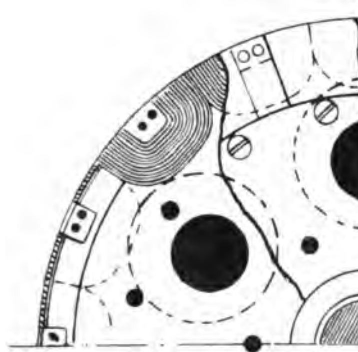


Fig. 63.



Fig. 64.

fertig gewickelt aufgeschoben. Der Anker, 448 cm Durchmesser, 130 cm lang, besteht aus dünnem Eisenblech mit zwischengelegtem Papier und achsialen Ventilationskanälen.

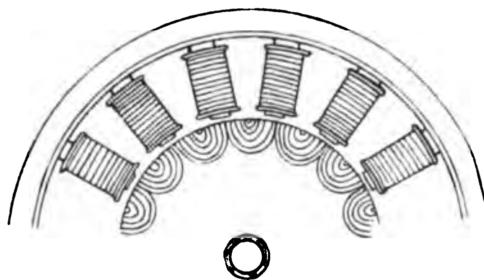


Fig. 65.

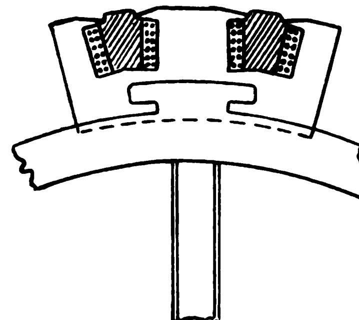


Fig. 66.

Die sechzehn Armaturspulen (Fig. 63, 64 u. 65) verlaufen zur Achse parallel und werden an den Stirnflächen um angeschraubte Vorsprünge gewickelt (Spulenanker). Die Maschinen wurden früher für 35, 70, 130 KW und für 1000—1100 Volt bei 1700—1200 Touren und 225 Perioden gebaut. Die Erregung geschieht entweder von aussen oder durch einen besonderen Kommutator, der aus isolierenden und leitenden Segmenten besteht. Die Erregung beträgt 2 Proc. der Nutzleistung. Fig. 66 zeigt ein Anker-

segment einer grossen Westinghouse-Maschine, die in Chicago ausgestellt war. Die Segmente sind aufgeschoben und die Spulen in die Nuten eingekeilt. Die neueren Westinghouse-Maschinen werden noch gesondert besprochen.

§ 28. Jablochkoff, Elwell-Parker, Hopkinson.

Aus dem Jahre 1878 rührt die eigenartige Maschine von Jablochkoff (Fig. 67 u. 68). Sie besitzt feststehende, aussenliegende induzierte Spulen (Ringwicklung), während die rotierenden Elektromagnete windschief gestellt sind, sodass jeder derselben gleichzeitig auf zwei Armaturspulen einwirkt.

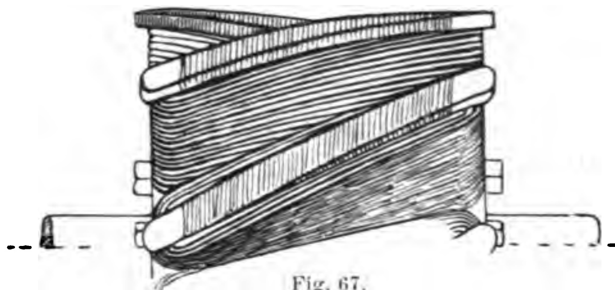


Fig. 67.

Die Innenpole bestehen aus 3—4 mm dicken Blechen und der Ankerkern aus 1 mm Blechen. Jede der sechzehn Ankerspulen speist eine Jablochkoff-Kerze.

In grossen Exemplaren wurde die im Jahre 1887 zuerst gebaute Maschine von Elwell-Parker ausgeführt. Fig. 69 stellt diese Aussenpolmaschine mit Ringanker dar. Der Ankerkern besteht aus Eisendraht, der ursprünglich

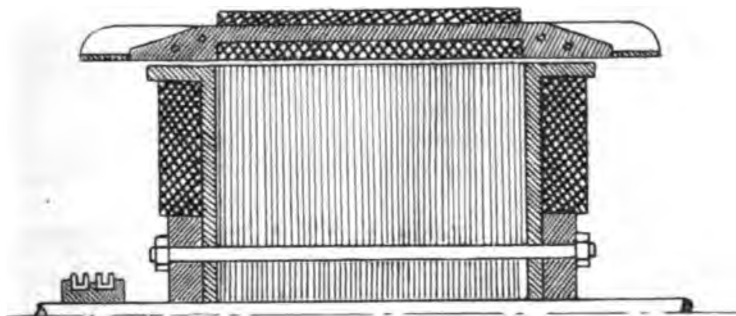


Fig. 68.

von den gusseisernen Radspeichen isoliert war, später aber direkt aufgewickelt wurde. Zuerst bestand der Stern sogar aus Kanonenmetall. Der Grammering enthält 22 Spulen zu 30 Windungen, die zu zwei isolierten Schleifringen geführt sind. Der Anker hat einen Durchmesser von 91 cm und ist 76 cm lang. Die Maschine macht 600 Umdrehungen und erzeugt bei 2000 Volt, 110 Perioden, 30 Amp. Sie wiegt 4000 kg.

Die Maschine von Hopkinson hat aufgeschraubte Aussenpole und leicht abnehmbare eisengeblätterte Kerne für die rotierenden induzierten Spulen (Polanker). Ausgeführt wurde diese Type von Messrs Mather & Platt (El. Rev. London, 1890, S. 89).

§ 29. Parson, Cail-Helmer, Tyne Alternator, Heissler.

Die Wechselstrommaschine von Parson (1887) ist nur zweipolig (Fig. 70 u. 71), da sie direkt mit einer Dampfturbine von 3000 Touren gekuppelt wird. Der Anker hat zwei Spulen in Trommelwicklung (Fig. 70), wovon jede den halben Umfang bedeckt. Die Trommel ist 75 cm lang und hat

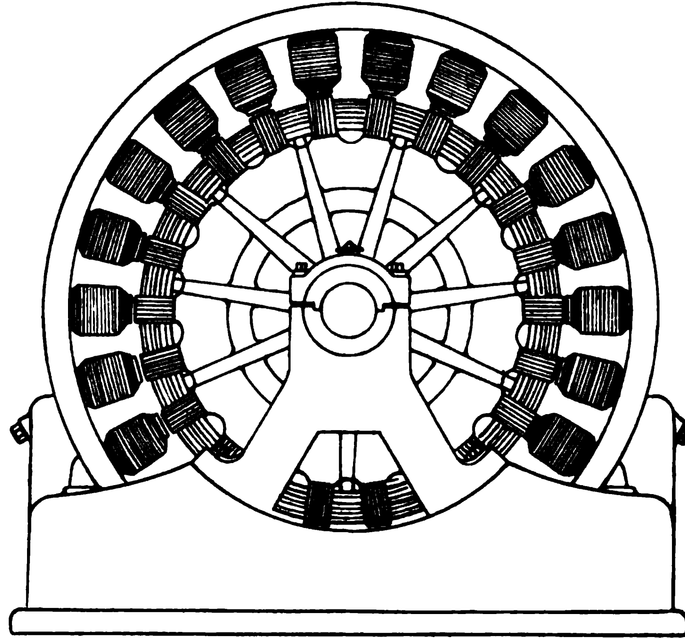


Fig. 69.

einen Durchmesser von 17,7 cm. Auch vierpolige Turbinen-Dynamos baut Parson und zwar ebenfalls für 3000 Touren. Die lamellierten Pole sind eingesetzt. Die Maschine hat Lochanker.

Eine seit 1890 gebaute Maschine von Cail-Helmer hat eigenartige Pole (Fig. 72 u. 73). Es sind Packete aus Eisenblech, die U-förmig gebogen

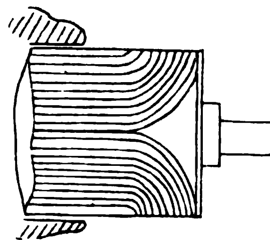


Fig. 70.

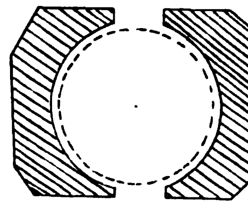


Fig. 71.

werden; zwei anstossende Schenkel bilden im induzierten und induzierenden Teil den Kern für eine Spule.

Der Tyne Alternator (El. Rev. London 1890, S. 721) hat zehn längliche, durch Halbkreise abgeschlossene (ovale) Aussenpole. Der Anker besteht aus rechteckigem Eisendraht, der auf eine Nabe gewickelt ist. Derselbe soll sehr luftig gewesen sein.

Die aus St. Louis (U. S. A.) stammende Maschine von G. HEISLER, die 1889 in Paris ausgestellt war, gleicht der GRAMME'schen Ringmaschine. Sie diente zur Speisung in Reihe geschalteter Glühlampen niedriger Spannung. Der feststehende Ring besteht aus acht schmiedeeisernen, sektorförmigen Kernen mit je vier Spulen. Es sind sechzehn rotierende Magnete vorgesehen, die von einem mitrotierenden Grammering den Erregerstrom erhalten. Der Erreger ist vierpolig. Der Generator speiste zwei Stromkreise, wobei die Ströme, wie bei der GRAMME'schen Maschine, um eine Viertelphase verschoben sind. Es wurden Spannungen bis 3000 Volt erzeugt.

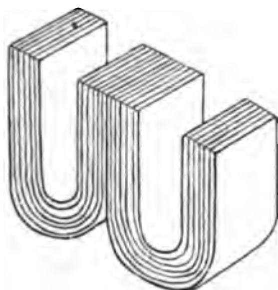


Fig. 72.

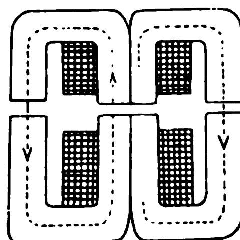


Fig. 73.

§ 30. Ältere Induktortypen.

Auf der Wiener Ausstellung 1883 war die erste grosse Maschine der Induktortype von KLIMENKO (Charkow) vorgeführt. Wie schon früher erwähnt, gehörten schon Maschinen aus den letzten Jahren des dritten Jahrzehnts des 19. Jahrhunderts der Induktortype an, aber sie ist eigentlich erst im letzten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts zu einem wirklich leistungsfähigen Generator geworden. Es mag nicht unerwähnt bleiben, dass das übliche Telephon zu den Induktorwechselstrommaschinen zu rechnen ist. Ich füge hier noch nach KELLY (El. Review New-York) einige historische Maschinen der Induktortype, die in England und Amerika ausgeführt wurden, an. Die Maschine Fig. 74 wurde KNIGHT 1854 in England patentiert. A ist der induzierende permanente Magnet, der die induzierten Spulen B trägt; vor den Polflächen rotiert der Kraftlinienträger C[1]).

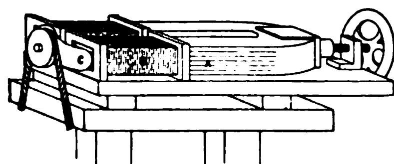


Fig. 74.

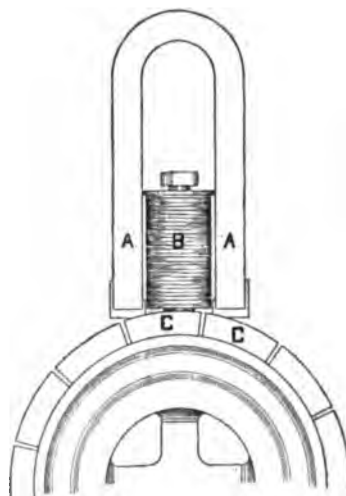


Fig. 75.

1) Die Bezeichnungen A, B, C sind in den nachfolgenden Skizzen von derselben Bedeutung.

Derartige Anordnungen werden wohl jetzt noch für Signalzwecke verwendet. Henley's Maschine (Fig. 75) besteht aus einem induzierenden Magneten *A*, der eine Spule *B* mit Eisenkern zwischen sich fasst. Ein Doppelrad verbindet in abwechselnder Reihenfolge durch die Stücke *C* den Nordpol des Magneten und dann den Südpol mit dem Kern von *B*. Der Entwurf von Wheatstone

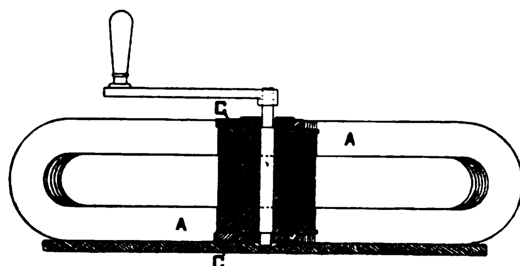


Fig. 76.

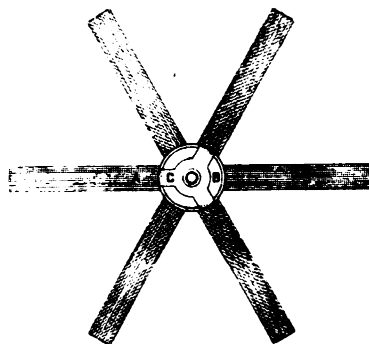


Fig. 77.

(Fig. 76 u. 77) gleicht in mancher Hinsicht den modernen Maschinen der Induktortype: *A* sind die permanenten Magnete, *B* eine grosse induzierte Spule, die an den Seiten mit den zwei Eisensternen *C* zur Kraftlinienführung versehen ist. Die Sterne *C* sind durch einen Eisencylinder, auf dem die Spule sitzt, magnetisch leitend verbunden. Bei all diesen Typen werden die permanenten Magnete, wegen des stark variierenden Kraftlinienflusses, mit der Zeit erheblich entmagnetisiert. Einen wesentlichen Fortschritt zeigt eine andere Type von Wheatstone (Fig. 78), worin die Variationen des Kraftlinienflusses auf den induzierten Teil *B* beschränkt bleiben. Das rotierende Eisenstück *C* führt abwechselnd die Kraftlinien durch zwei gegenüberliegende Paare induzierter Spulen *B*. Diese Maschine wurde im Telegraphendienst verwendet. Eine von Martin & Varley entworfene Maschine (1868) ist in Fig. 79 u. 80 gezeigt. Die rotierende Eisenscheibe *C* schliesst abwechselnd den magnetischen Kreis der Magnete *A'*. Die induzierte Spule ist wieder *B*.

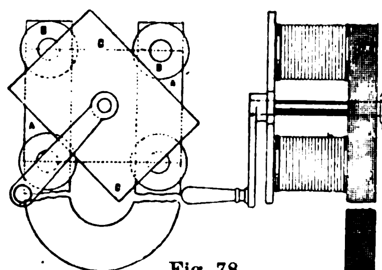


Fig. 78.

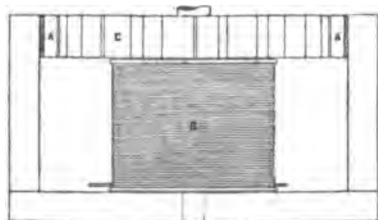


Fig. 79.

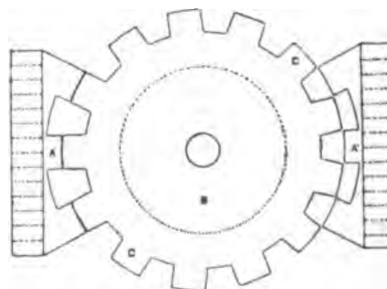


Fig. 80.

Interessant ist die Maschine von HOLMES (1868): Fig. 81 u. 82. Je eine gemeinsame grosse Erregerspule *A* magnetisiert eine Reihe klauenartig ineinandergreifender Pole *A'*, welche rotieren. Die induzierten Spulen liegen

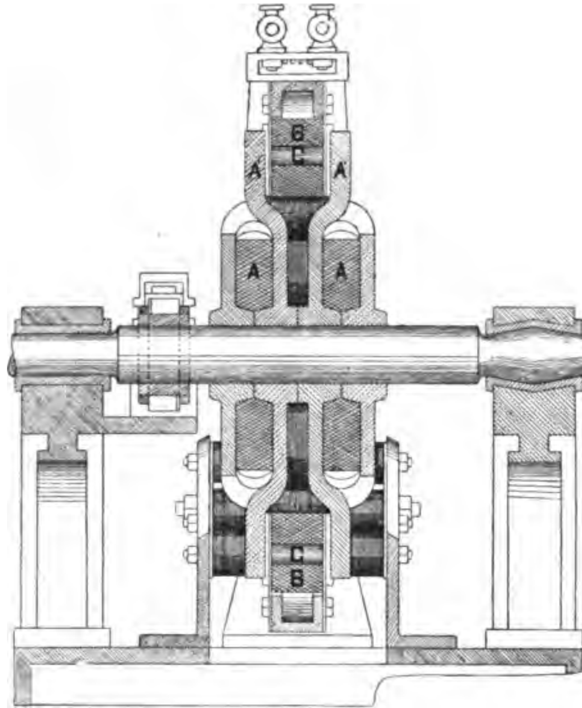


Fig. 81.

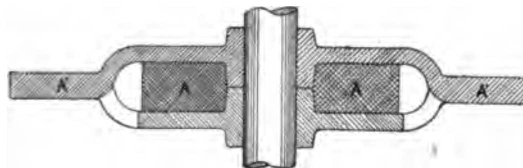


Fig. 82.

in *B*, der Kern *C* giebt die Ursache zur Kraftlinienänderung. Die Kerne der Spulen sind zur Verhinderung von Wirbelströmen geschlitzt. Nach Erfindung der Gleichstrommaschine durch GRAMME tauchten längere Zeit nur wenig neue Wechselstrommaschinen im allgemeinen und der Induktortype im speciellen auf. VARLEY baute im Jahre 1877 die Maschine Fig. 83 u. 84. Die

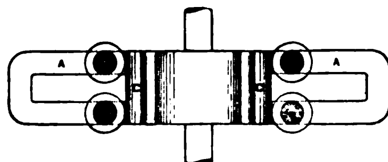


Fig. 83.

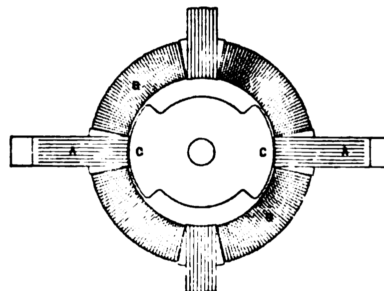


Fig. 84.

Magnete *A* werden abwechselnd durch den rotierenden Teil *C* kurzgeschlossen, sodass in den Spulen *B* elektromotorische Kräfte erzeugt werden. Der Kraftlinienfluss in den Magneten *A* bleibt annähernd konstant..

JABLOCHKOFF gab sich ebenfalls mit der Konstruktion einer Induktortype ab, die in Fig. 85 skizziert ist. All diese früheren Induktormaschinen wiesen ganz bedeutende Eisenverluste auf.

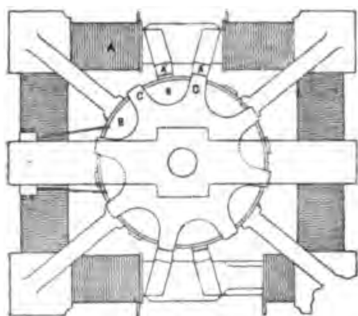


Fig. 85.

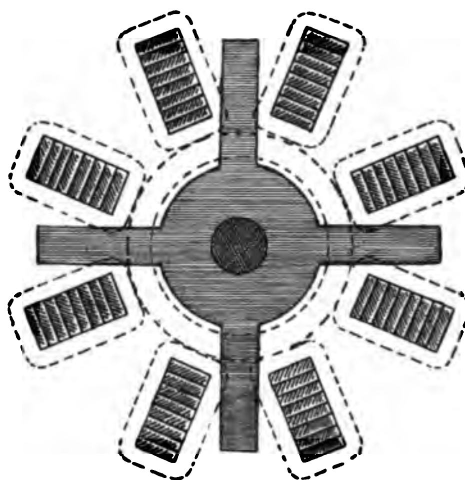


Fig. 86.

Zurückkehrend zu der eingangs erwähnten Maschine von KLIMENKO, die in Fig. 86 abgebildet ist, sieht man, dass dieselbe am Ende einer rotierenden Welle je ein vierarmiges Gusskreuz zeigt. Eines enthält lauter Nord-, das andere lauter Südpole; beide sind durch einen Cylinder verbunden, über dem ruhend die gemeinsame Erregerspule liegt. Die induzierten Spulen sind auf

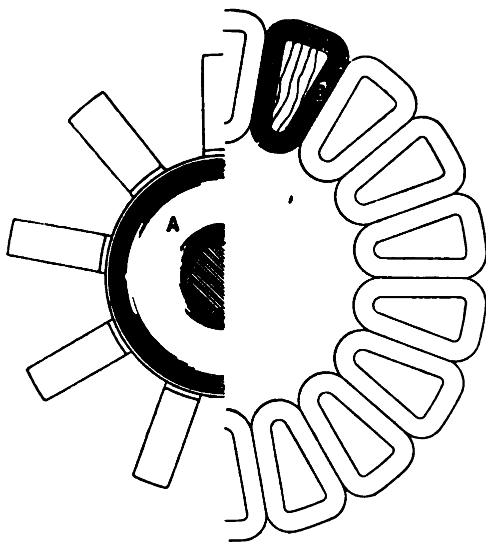


Fig. 87.

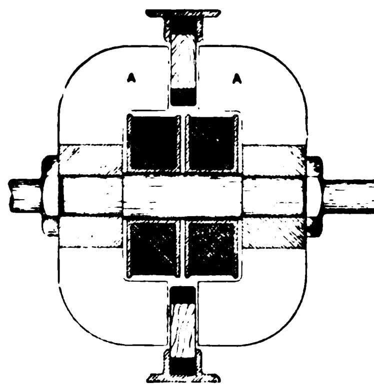


Fig. 88.

schmiedeeiserne Kerne gewickelt, die auf ein kreisförmiges Seitengestell aufgeschraubt sind. Die Maschine hat acht Spulen, macht 1000 Touren und speist acht hintereinander geschaltete JABLOCHKOFF-Kerzen zu 5 Amp. Sie

erforderte zum Leerlauf bei normal erregtem Magneten mehr Arbeit, als wenn sie mit dem normalen Nutzstrom belastet wurde.

Sehr nahe verwandt mit der Induktortype ist die im Jahre 1888 von MORDEY konstruierte Wechselstrommaschine (Fig. 87 u. 88). Auf der Achse sitzt ein Eisencylinder, der beiderseits in einer grösseren Zahl umgebogener Pole endigt (Fig. 89). Die ungleichnamigen stehen einander gegenüber und lassen einen Spalt für die induzierten Spulen *B*. Unterhalb dieser ist auf den Eisencylinder eine gemeinsame grosse Erregerspule *A* gewickelt. Der Zwischenraum für die Ankerspulen ist sehr schmal, letztere sind aus dünnem Kupferband zusammengesetzt, das auf Porzellankerne gewickelt ist. Am Aussenrand ist die Spule §31. Mordey Alternator.


Fig. 89.


Fig. 90.

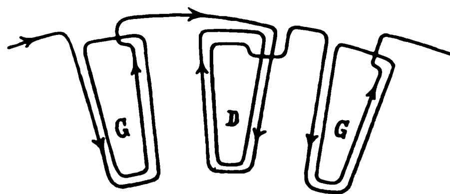


Fig. 91.

(Fig. 90) gefasst und die Klemmstücke sind an einen Ring aus Kanonenmetall geschraubt. Die Klemmstücke und die Schrauben bestehen zur Verringerung der Wirbelströme aus Neusilber, die induzierten Spulen enthalten also gar kein Eisen; die einzelnen Spulen sind sehr leicht zur Reparatur abzunehmen. Die Schaltung der einzelnen Spulen entspricht Fig. 91. Ein sogenannter Mordey-Victoria Alternator von der Anglo-American-Brush-Electric Light Corporation liefert bei 650 Umdrehungen in der Minute 37 500 Watt bei 2000 Volt. Der Spannungsabfall bei Belastung, die Erwärmung und der Wirkungsgrad sind äusserst günstig. Zur Erregung dient eine besondere Maschine und zwar werden durch Vermittlung von Bürsten und Schleifringen der Erregerspule 500 Watt zugeführt. Der totale Wirkungsgrad beträgt bei Volllast 90 Proc. Im Gegensatz zu den meisten eigentlichen Induktormaschinen rotiert in der MORDEY'schen Maschine die grosse Erregerspule. Es wäre jedoch leicht zu erreichen, sie feststehend anzuordnen.

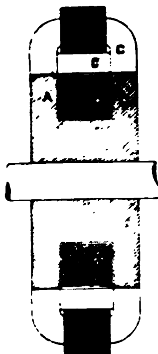


Fig. 92.

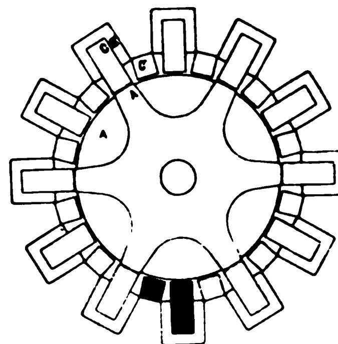


Fig. 93.

Im gleichen Jahre liess sich MORDEY auch noch einige ähnliche Maschinen patentieren, die jedoch Eisenkerne enthielten. In Fig. 92 u. 93 ist *A* wieder die Erregerspule, *A'* sind die Feldpole, *B* die induzierten Spulen, *C* und *C'* die kraftlinienführenden Eisenstücke. Die Teile *C'* schliessen abwechselnd die Pole *A'* kurz.

§ 32. Brush-Maschine. Die Wechselstrommaschine der amerikanischen Brush Electric Co. (1889) für eine Nutzleistung von 60000 Watt bei 2000 Volt Spannung gleicht in ihrem Anker sehr der MORDEY'schen Konstruktion. Links und rechts von der Ankerscheibe rotieren jedoch zwei Kränze von zwölf bewickelten Elektromagneten, deren entgegengesetzte Pole sich gegenüberstehen. Die zwölf Ankerspulen aus Kupferband auf Porzellanstücken können einzeln in einen runden Ständer eingeschoben werden. Sie sind durch isolierende Platten abgedeckt, mit Neusilberflantschen versehen und haben sektorförmiges Aussehen.

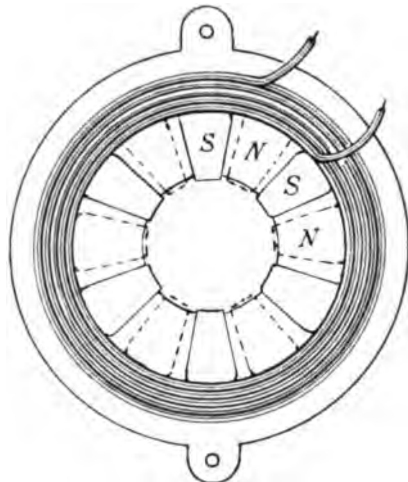


Fig. 94.

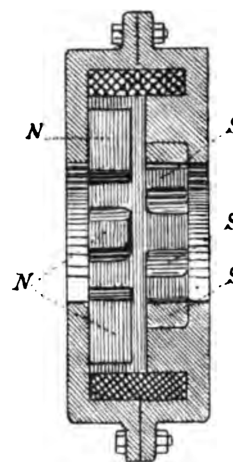


Fig. 95.

Die 14 mm dicke Armatur lässt in der Mitte Raum für die Rotationsachse mit den Magneten. Jede der leicht ersetzbaren Spulen wiegt 10 kg. Der Erregerstrom wird durch Schleifringe, die ausserhalb der Lager sitzen, und durch die hohle Achse den Erregerspulen zugeführt. Bei 1100 Touren werden 110 Perioden erzeugt. Der Spannungsabfall ist kleiner als 10 Proc.

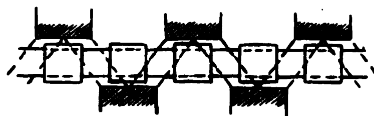


Fig. 96.

§ 33. Flachring von Kennedy u. von Kapp. Die Flachringmaschine von KENNEDY (Fig. 94—96) (1888) hat eine grosse Magnetisierungsspule, die ein Cylinder mit je sechs vorspringenden Polen umschliesst, zwischen denen der Anker rotiert. Die gegenüberstehenden Pole passen je in die gegenüberliegende Lücke (Fig. 96). Der Ringanker besteht aus einem gegossenen Rad, auf welches Eisenband gewickelt ist. Die Spulen liegen am innern Umfang sich sehr nahe, während aussen zwischen zwei Spulen mehr als die halbe Spulenbreite freiliegt. Der Anker enthält 12 Spulen à 18 Windungen, macht 800 Umdrehungen, erzeugt 10500 Watt und benötigt total 14250 Erregerampèrewindungen.

KAPP's Wechselstrommaschine (1889) ähnelt in ihrem äusseren Aufbau der vielpoligen SCHUCKERT'schen Flachringmaschine. Die Rückplatten (Fig. 97 u. 98) bestehen aus Guss, die Pole aus Schmiedeeisen, die Polschuhe (Fig. 29) sind trapezförmig, die Pole selbst rund; der Ankerkern ist aus Bandeisen aufgewickelt. Gegen den magnetischen Zug sind die Spulen durch Keile und radiale Schrauben geschützt. Die Maschinenfabrik Oerlikon baute zwei derartige Typen für 60 und 120 KW; die kleinere hat einen Ankerdurchmesser von 78,8 cm, eine radiale Tiefe von 22 cm und eine Breite von 7,6 cm. Der Anker hat 14 Spulen zu 80 Windungen. Die Polschuhe für die 28 Magnete haben je einen Querschnitt von 18 mal 7,7 cm. Pro Polpaar wurden 12000 Ampèrewindungen und zur totalen Erregung 5,3 Proc. der äusseren Leistung aufgewendet.

§ 34. Mehrphasenströme (1888—1891).

Das Jahr 1888 bezeichnet einen bedeutsamen Markstein in der Geschichte der Wechselstromtechnik, indem FERRARIS und TESLA das Mehrphasensystem in seiner wirklichen Tragweite entdeckten. Die Wechselstrommaschinen waren nämlich bis dahin

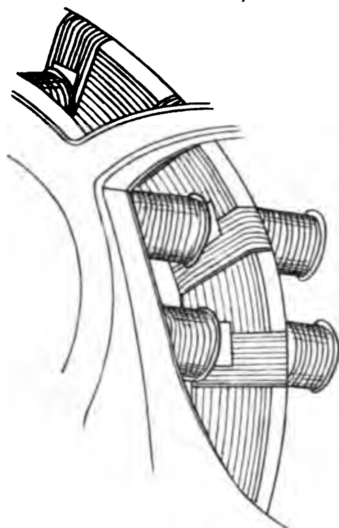


Fig. 97.

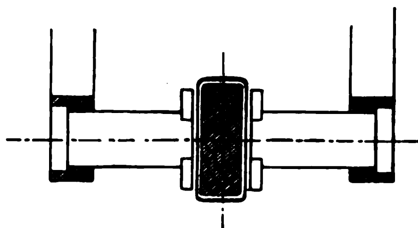


Fig. 98.

im wesentlichen auf Glüh- und Bogenlicht beschränkt geblieben; zur Kraftübertragung eigneten sie sich schlecht, da es keinen brauchbaren Wechselstrommotor gab. Es waren auch nur Wechselstrommotoren von kaum nennenswerter Leistung gebaut worden. Nachdem schon vorher in den Oerlikoner Werken Versuche mit hochgespannten Dreiphasenströmen angestellt und zum Antrieb von synchronen und asynchronen Drehstrommotoren benützt worden waren, bewies die Frankfurter Ausstellung 1891 die Möglichkeit der Übertragung grosser Kräfte auf weite Entfernung mittelst Drehstroms. Eine Leistung von über 100 PS wurde bei 15000 bis 30000 Volt von Lauffen nach Frankfurt, also auf 175 km Entfernung bei 75 Proc. nutzbarer Energie übertragen. Dem chronologischen Gang vorausgreifend sei anschliessend erwähnt, dass sich von da ab die Drehstromkraftübertragungen in allen Ländern, namentlich in Amerika und in der Schweiz, in ungeahnter Weise ausdehnten. An den Niagarafällen kamen sogar Maschinen von 5000 PS zur Aufstellung. Ende 1893 baute man in Amerika die erste Mehrphasenmaschine, Mitte 1896 waren schon 50000 PS davon in Betrieb.

§ 35. Drehstrommaschinen von Haselwander, Bradley, Schuckert, Oerlikon.

Auf der internationalen Ausstellung in Frankfurt wurden im Jahre 1891 zum erstenmal Wechselstrommaschinen gezeigt, welche speziell zur Erzeugung von Mehrphasenströmen gebaut waren. Der erste dieser Apparate stammt von HASELWANDER in Offenburg; derselbe wurde schon im Jahre 1887 gebaut. Gemäss Fig. 99 handelt es sich um eine vierpolige Innenpolmaschine mit

aussenliegendem Ringanker. Der Anker besitzt 12 Spulen zu 52 Windungen eines Kupferdrahtes von 1,5 mm Durchmesser. Die Spulen mit einem Strich gehören einer Phase, die mit zwei Strichen der zweiten und die mit drei Strichen der dritten Phase an. Der Eisenkern aus aufgewickeltem Draht hat 40 cm Durchmesser, 18 cm Breite und 3 cm Dicke. CHARLES S. BRADLEY reichte schon anfangs 1887 ein Patent auf die Zweiphasenmaschine Fig. 100

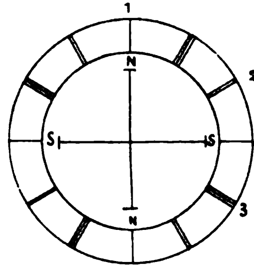


Fig. 99.

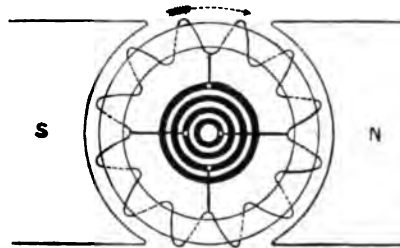


Fig. 100.

ein, die einen Gleichstromanker besitzt, dessen Wicklung in vier um 90° versetzten Punkten mit Schleifringen verbunden ist.

Die Wechselstrommaschine von SCHUCKERT auf der Frankfurter Ausstellung zeigte die bekannte Flachringkonstruktion. Die induzierten Spulen waren einerseits mit Schleifringen verbunden, von denen ein-, zwei- und drei-

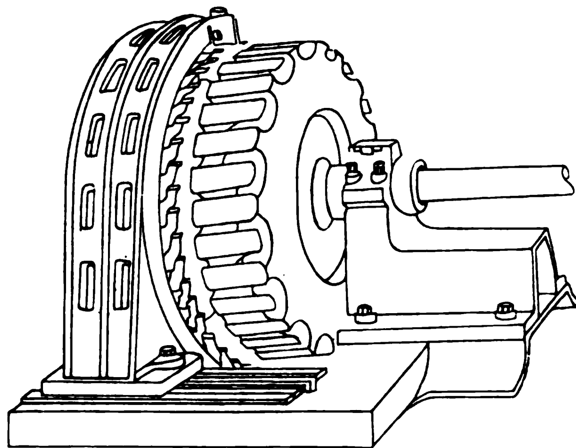


Fig. 101.

phasiger Wechselstrom abgenommen werden konnte, und auf der andern Seite mit einem Gleichstromkollektor.

Der Drehstromgenerator Fig. 101, der im Jahre 1891 zur Übertragung nach Frankfurt in Lauffen aufgestellt war, rührte von der Maschinenfabrik Oerlikon her. Das Magnetfeld (Fig. 102 u. 103) aus Stahlguss, das rotiert, hat zur Erregung eine grosse Spule, welcher der Erregerstrom von einer kleinen BROWN'schen Manchestermaschine zugeführt wird und zwar durch Schleifringe, in deren Rillen ein endloser Kupferdraht läuft. Um die Er-

regerspule biegen sich klauenartig abwechselnd Nord- und Südpole. Es sind im ganzen 32 Pole. Die Erregerspule trägt 496 Windungen 5 mm starken Kupferdrahts und wiegt 424 kg. Der aussenliegende induzierte Teil besteht aus dreimal 32 Kupferstäben von 29 mm Durchmesser, die in Röhren aus

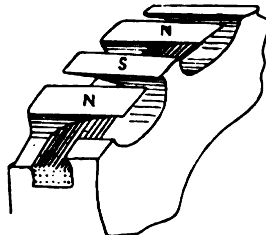


Fig. 102.

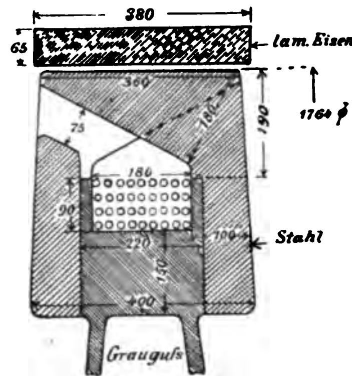


Fig. 103.

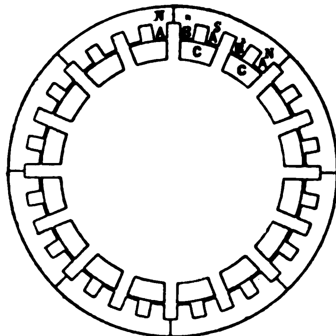
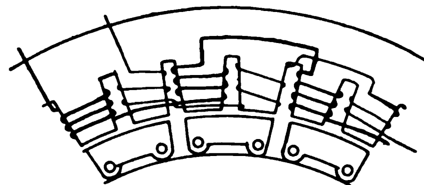


Fig. 104.


Fig. 105.

Asbest gehüllt sind. Der Nuten-(Loch-)durchmesser ist 33 mm. Der Anker ist aus lamelliertem Blech aufgebaut, das Speichenrad ist aus Grauguss gegossen.

Die der Induktortype angehörige Maschine von Kingdon (Fig. 104 u. 105) war ebenfalls auf der Frankfurter Ausstellung. Aussen liegt ein Ring aus **§ 36. Induktortype von Kingdon, Call-Helmer, E. Thomson, Mordey.**

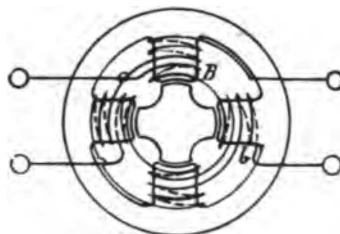


Fig. 106.

isolierten Eisenstreifen, auf denen eine Reihe Vorsprünge vorgesehen, die abwechselnd als Feldmagnete und als induzierte Spulen ausgebildet sind. Innerhalb rotiert ein Rad mit Eisenzähnen *C* und zwar deren ebensoviele wie Pole. Die Zähne sind von einander isoliert. Die Zahnbreite ist gleich dem Abstand zweier Kerne. Die Kraftlinienänderung bleibt im wesentlichen auf die Polfortsätze beschränkt.

Eine ähnliche Maschine aus dem Jahre 1890 ist diejenige von CAIL-HELMER (Fig. 106). Auf vier Aussenpolen sind vier Spulen *B* zur Magnetisierung aufgebracht und darüber vier induzierte Spulen *b*; innerhalb der

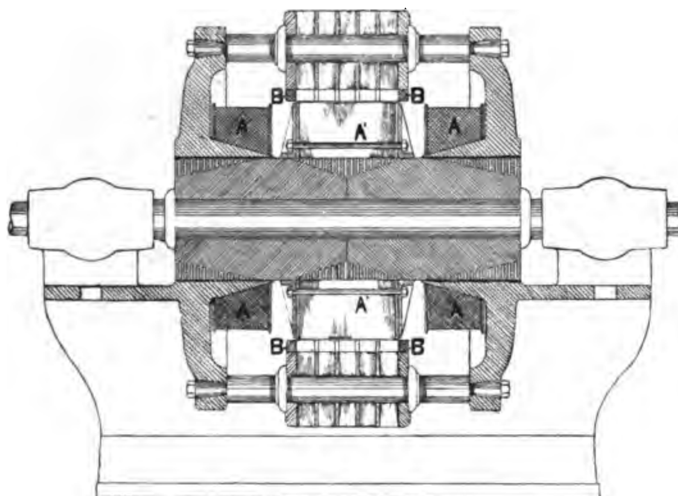


Fig. 107.

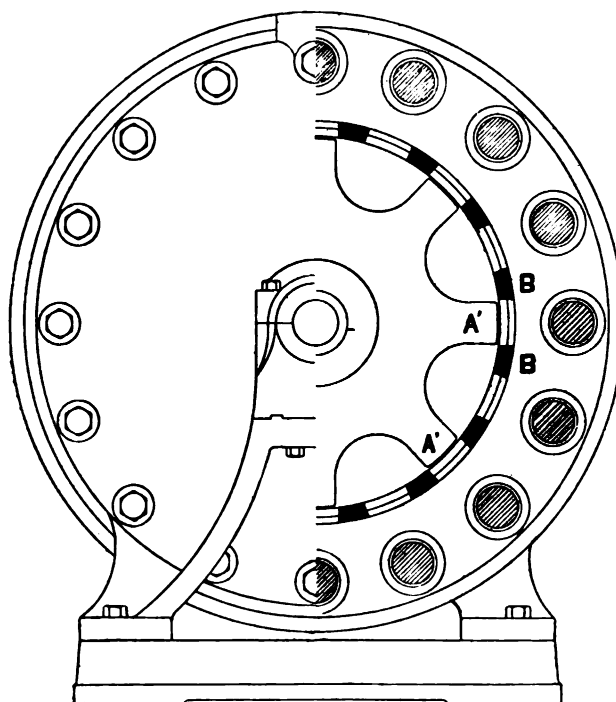


Fig. 108.

Pole rotiert ein vierteiliger Eisenstern. E. THOMSON baute im Jahre 1890 die Gleichpoltype Fig. 107 u. 108. Die Maschine hat zwei erregende Spulen *A*; die rotierenden induzierenden Pole sind mit *A'* bezeichnet; die

induzierten Spulen liegen an dem innern Umfang eines unterteilten Cylinders. Die Maschine hat an drei Stellen Luftzwischenräume.

Die Anordnung der Induktortype von MORDEY ist in Fig. 109 skizziert. Eine grosse Spule *B* magnetisiert eine Reihe Hufeisen *F*, auf denen die induzierten Spulen angeordnet sind. Innerhalb dieses Gestelles rotiert ein

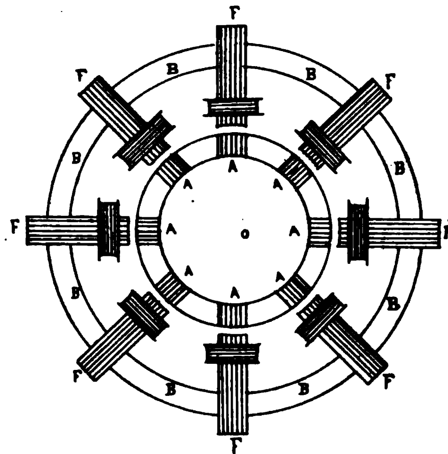


Fig. 109.

Ankerrad *A*, das die Hufeisen *F* abwechselnd kurz schliesst. Eine zweite Anordnung von MORDEY (Fig. 16) ersetzt die einzelnen induzierten Spulen durch eine grosse Spule *b*.

Es würden sich nunmehr die verschiedenen modernen Konstruktionen der elektrotechnischen Firmen anschliessen; dieselben sind jedoch in einem besonderen Kapitel: „Neuere Typen von Wechselstrommaschinen“, ausführlich behandelt.

B. Die Wechselspannung und die Wechselstromwicklungen.

5. Elektromotorische Kraft.

§ 37. Grundbeziehung für die E. M. K. Bezeichnet man mit K den zu einem Polpaar gehörigen, wechselnden Kraftlinienfluss in einer Wechselstrommaschine und mit z die in gleicher Lage befindlichen, hintereinander geschalteten Windungen, so wird die induzierte elektromotorische Kraft e ausgedrückt durch die Gleichung:

$$e = z \frac{d K_t}{d t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Die prinzipiellen theoretischen Erwägungen werden zunächst am übersichtlichsten, wenn für die Kraftlinienänderung K eine Sinuslinie vorausgesetzt wird:

$$K_t = K \cos \alpha = K \cos 2 \pi n t.$$

Es ergiebt sich dann für die elektromotorische Kraft eine Sinuslinie, die gegen die erstere K um 90^0 versetzt ist (Fig. 110).

Besitzt eine Wechselpoltype 2 p-Pole bezw. eine Gleichpoltype p Polansätze und macht sie u Umdrehungen in der Minute, so ist die Zahl der sekundlich erzeugten Perioden der Wechselspannung:

$$n = \frac{u}{60} p \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

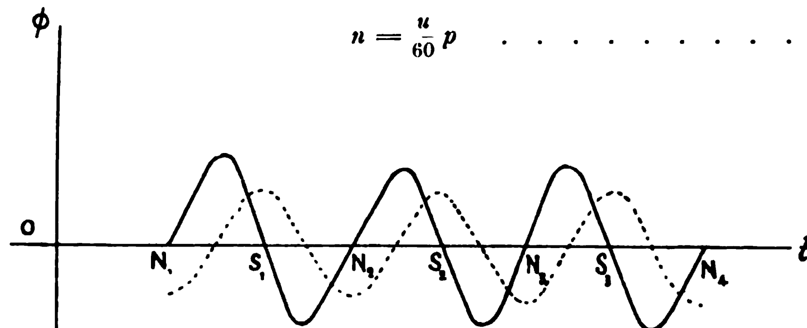


Fig. 110.

und die Zeit T einer Periode

$$T = \frac{1}{n} \qquad (3)$$

In der Wechselstromtechnik wird im allgemeinen nicht mit dem momentanen Werte e der elektromotorischen Kraft gearbeitet, sondern meist mit dem sogenannten effektiven Wert E, d. h. mit der Wurzel aus dem mittleren Quadrat aller Momentanwerte. In manchen Fällen wird auch die mittlere elektromotorische Kraft E_m, d. h. der einfache Mittelwert aus den einzelnen Momentanwerten benutzt. Durch Integration der Gleichung (1), also durch Bildung des Ausdrucks § 38. Effektivwert. Mittelwert.

$$\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e^2\,dt}$$

findet sich der Wert von E zu

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}\,n\,z\,K \qquad (4)$$

oder bei Ersatz des absoluten Systems durch Volt und der Windungszahl z durch die Leiterzahl $Z = 2z$

$$E = 2{,}22\,n\,Z\,K \cdot 10^{-8} \qquad (5)$$

K ist stets die Hälfte der auftretenden Gesamtkraftlinienänderung, ob es sich um die Gleichpol- oder die Wechselpoltype handelt, bei letzterer ist K das absolute Maximum (die Amplitude), bei ersterer die halbe Differenz des grössten und kleinsten Wertes. In den Formeln, die z enthalten, ist die von den Spulen umfasste Kraftlinienzahl, in denjenigen mit der Leiterzahl Z die geschnittene Kraftlinienzahl, d. h. die von einem Pol ausgehende Anzahl einzusetzen.

Durch Integration des Ausdrucks

$$\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e\,dt \qquad (6)$$

findet sich in absolutem Masse

$$\left.\begin{aligned} E_m &= 2\,n\,z\,K \\ E_m &= 2\,n\,Z\,K \cdot 10^{-8} \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

oder in Volt

Ist der Verlauf der Kraftlinien nicht sinusförmig, so liesse er sich in jedem Falle nach der FOURIER'schen Reihe in einzelne Sinusschwingungen von ansteigender Periodenzahl zerlegen; durch Differenzieren dieses Ausdrucks würde sich wiederum die elektromotorische Kraft ergeben. § 39. Nicht sinusförmige E. M. K.

Der in der Wechselstromtechnik übliche Gang ist jedoch der, dass man in der Gleichung (4) für verschiedenen Kraftlinienverlauf den an die Stelle von 2,22 tretenden Koeffizienten c bestimmt. Eine einfache Überlegung zeigt, dass der sogenannte Formfaktor $\frac{c}{2}$ nichts anderes ist als das Verhältnis der effektiven elektromotorischen Kraft E zu deren Mittelwert E_m. Für eine Reihe verschiedener Formen elektromotorischer Kräfte ist nachstehend der Formfaktor angegeben, der sich durch Bildung des Ausdrucks $\frac{E}{E_m}$ ermittelte:

Kurvenform der elektromotorischen Kraft	Darstellung	Formfaktor c/e
Rechteck		1,00
Halbellipse		1,04
Halbkreis		1,04
Halbellipse		1,04
Sinuslinie		1,11
Dreieck		1,15
Umgekehrte Viertelsinuslinien		1,31
Umgekehrte Viertelskreise oder Viertelsellipsen . .		1,44

6. Kurvenform der elektromotorischen Kraft.

§ 40. Beispiele von Kurven der E. M. K.

Die Form der elektromotorischen Kraft von Wechselstrommaschinen hängt von der Art der Wicklung ab, d. h. von dem Raum und der Unterteilung der einzelnen Spulen, ferner von dem Verhältnis Polbreite P zur Teilung τ und

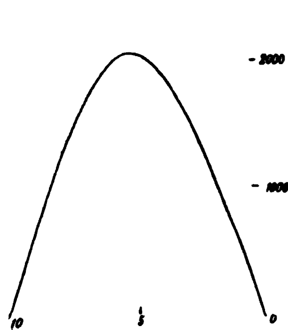


Fig. 111.

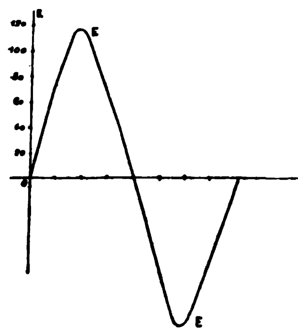


Fig. 112.

in gewissem Sinne auch davon, ob Eisen innerhalb der induzierten Spulen verwendet wird oder nicht. Im ersten Fall ist die magnetische Sättigung und die Grösse der Hysteresis von Einfluss. Die Kurvenform wird auch durch die Art und die Grösse der Belastung beeinflusst.

Als typisches Beispiel für Maschinen mit sinusförmiger Spannungskurve gilt die alte Siemens-Maschine mit rotierendem Scheibenanker (Fig. 45 u. 46), wobei kein Eisen im Anker verwendet ist. JOUBERT hat seinerzeit eingehende Kurvenaufnahmen an einem SIEMENS'schen Generator ausgeführt. Die Kurve Fig. 111 ist an einem solchen gefunden worden. Die von BLONDEL[1]) aufgenommene Kurve Fig. 112 ist einem SIEMENS-LABOUR-Generator (S. 26) bei Leerlauf entnommen. Eine Aussenpolmaschine, ziemlich jüngeren Datums,

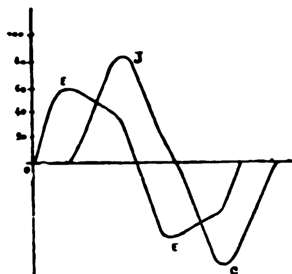


Fig. 113.

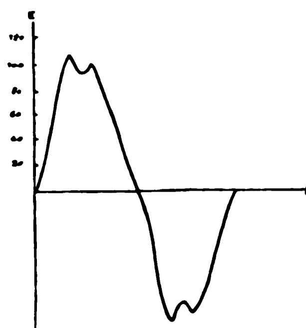


Fig. 114.

von LABOUR ergab bei offenem Stromkreis ungefähr die elektromotorische Kraft Fig. 111. Der Generator ist mit zwei Wicklungen versehen. Bei Kurzschluss der einen Wicklung, wobei dieselbe den in Fig. 113 gezeichneten Strom J liefert, nimmt die elektromotorische Kraft des andern Kreises die Form Fig. 113 an, während bei normaler Belastung die elektromotorische Kraft nicht wesentlich von der erstgezeichneten Kurve Fig. 111 abweicht.

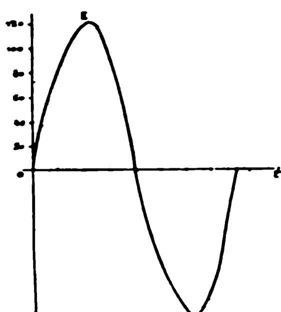


Fig. 115.

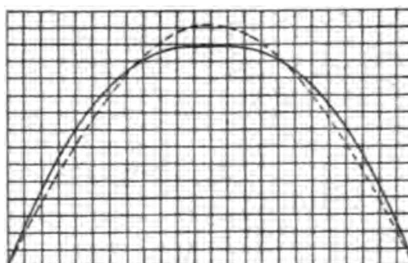


Fig. 116.

Die elektromotorische Kraft einer Méritens-Maschine, die in dem Abschnitt „Historisches" behandelt wurde, zeigt den Verlauf Fig. 114. Bei einiger Belastung verschwindet der doppelte Höcker gemäss Fig. 115. Die grossen 5000 pferdigen Niagaramaschinen (Aussenpoltye, Nutenanker, Stabwicklung, zweiphasig) haben sehr sinusähnliche Kurven (Fig. 116): die ausgezogene Linie ist der Maschine eigentümlich, die gestrichelt gezeichnete entspricht der äquivalenten Sinuslinie, d. h. der Sinuslinie, die gleichen effektiven

1) Lum. Électr. Bd. 49 (1893) S. 440.

Wert hat. In gleicher Weise sind in Fig. 117 die Verhältnisse für eine Drehstrommaschine von ALIOTH skizziert: die Maschine hat eine grosse Erregerspule und wird bei den Maschinen der genannten Firma behandelt. Der Formfaktor ist 1,06. Von der Maschinenfabrik Oerlikon (Kolben) wurden seinerzeit in charakteristischer Weise die Kurven Fig. 118 veröffentlicht,

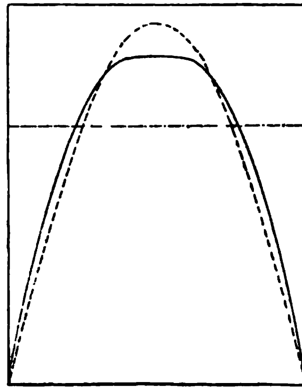


Fig. 117.

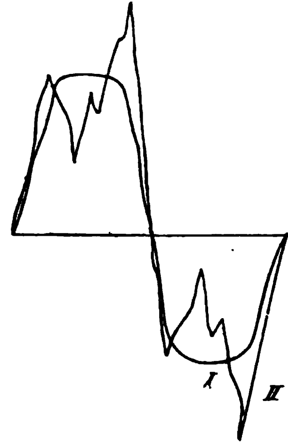


Fig. 118.

wobei die Kurve *I* die elektromotorische Kraft eines 200 pferdigen Generators darstellt, welche man als abgeflachte Sinuslinie auffassen kann; bei Belastung mit einem 200 pferdigen asynchronen Motor stellte sich die vielzackige Kurve *II* ein.

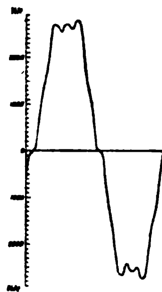


Fig. 119.

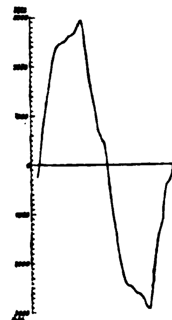


Fig. 120.

An einer Drehstrommaschine von SIEMENS & HALSKE (Innenpoltype) wurde für Leerlauf die Spannungskurve Fig. 119 aufgenommen; für Volllast, d. h. für 180 KW bei 2000 Volt geht die Kurve in den Verlauf Fig. 120 über. Die Fig. 119 lässt sich ziemlich gut darstellen durch die Formel:

$$\sin 2\pi n t + 0{,}087 \sin (10\, \pi n t + \pi) + 0{,}052 \sin 22\, \pi n t.$$

Der Fig. 120 entspricht annähernd der Ausdruck

$$\sin 2\, \pi n t + \frac{1}{15} \sin \left(10\, \pi n t + \frac{3\pi}{2}\right).$$

Während 2000 Volt effektive Spannung bei Sinusform einer Maximalspannung von 2828 entspricht, ist dieser Maximalwert für die unbelastete Maschine 2827, für die belastete 2930. Ein ganz interessantes Bild ergeben die ebenfalls an einer Siemens & Halske'schen Maschine (Dresdener Bahnhöfe) gefundenen Kurven (Fig. 121 u. 122). Es sind die Kurven für die drei einzelnen Phasen aufgezeichnet, welche durchaus nicht gleichartig ausfallen. Die Phase *ab*, welche in beiden Figuren belastet ist, zeigt am wenigsten Unregelmässigkeit in ihrem Verlauf. Die Wicklung liegt in Nuten eines Eisenkerns, die zuerst ungeschlitzt waren (1. Figurengruppe) und dann geschlitzt wurden (2. Figurengruppe). Neben den einzelnen Kurvenscharen sind je die Effektivwerte der einzelnen verketteten Spannungen zu einem

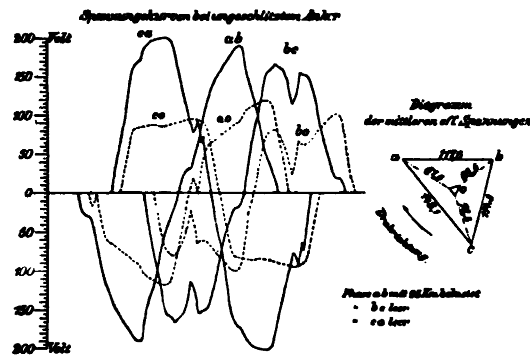


Fig. 121.

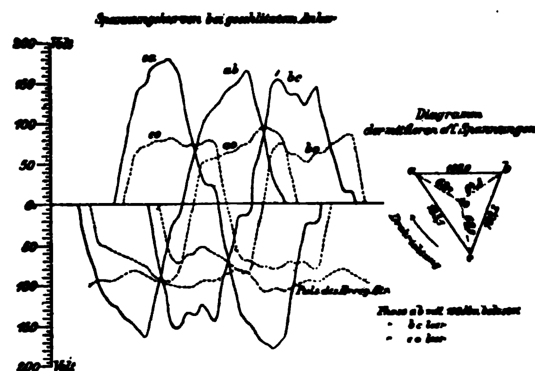


Fig. 122.

Dreieck zusammengesetzt, das bei gleicher Grösse der drei Spannungen und genau gleichmässiger Verteilung im Raum gleichseitig wäre. Die innerhalb des Dreiecks gezogenen Linien stellen die Phasenspannung dar, bei Sinusform würden sie sich in einem Punkte schneiden, im vorliegenden Fall tritt an Stelle des Schnittpunkts ein kleines Dreieck.

Durch verschiedene Schaltung einer gewöhnlichen Dreiphasenmaschine lassen sich je nach Wunsch sinusähnliche, flache oder spitze Kurven erzeugen. Fig. 123 ist die Spannungskurve einer einzelnen Phase einer kleinen Innenpolmaschine von Siemens & Halske. Schaltet man zwei Phasen hintereinander, so ergiebt sich die sinusähnliche Kurve Fig. 124. Es ist dies die Superposition zweier Kurven Fig. 119, die um 60° verschoben sind. Ver-

bindet man endlich alle drei Phasen nach Fig. 125 hintereinander, so entsteht die spitze Kurve Fig. 126, eine Superposition der Kurve Fig. 123 mit Fig. 124 bei einer Verschiebung von 90°.

Die Spannungskurve Fig. 127 von einem kleinen sechspoligen Induktorgenerator der Maschinenfabrik Oerlikon ist in ihre Partialkurven zerlegt[1]):

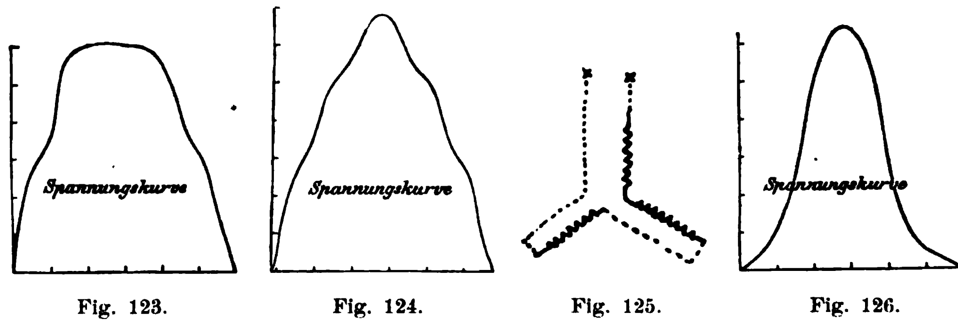


Fig. 123. Fig. 124. Fig. 125. Fig. 126.

$$73{,}2 \sin a + 1{,}94 \sin 3\,a - 2{,}74 \sin 5\,a + 2{,}76 \sin 7\,a - 2{,}66 \sin 11\,a + 2{,}08 \sin 13\,a - 0{,}5 \sin 15\,a + 2{,}42 \cos a + 0{,}40 \cos 2\,a + 0{,}74 \cos 3\,a - 1{,}94 \cos 5\,a + 0{,}87 \cos 7\,a - 2{,}1 \cos 11\,a + 2{,}64 \cos 13\,a.$$

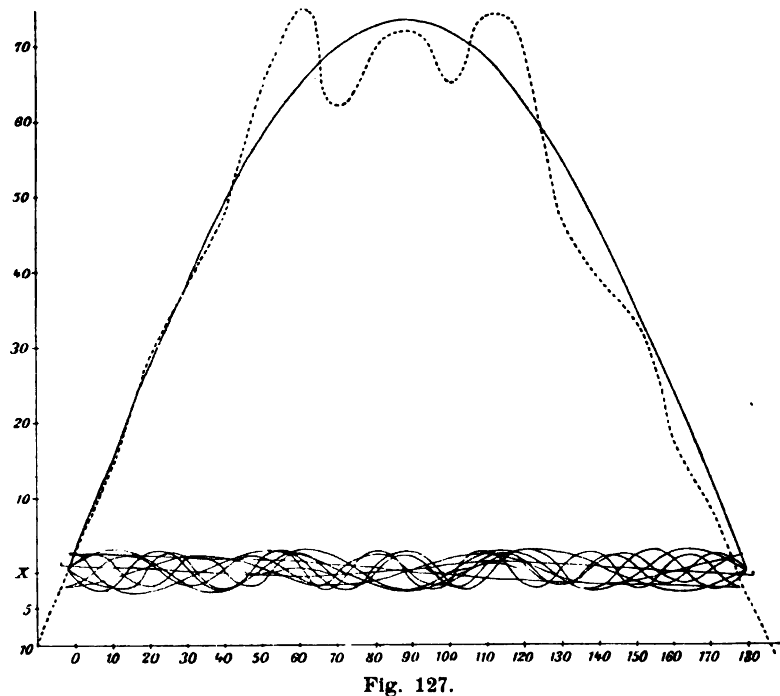


Fig. 127.

Maschinen, deren magnetischer Widerstand bei einer Drehung von Polmitte zu Polmitte nicht konstant bleibt, die also z. B. eine sehr grobe Nutteilung haben oder mit Polanker ausgeführt sind, liefern im allgemeinen

1) Die Kurven Fig. 111 u. 127 sind vom Verfasser seinerzeit im Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule Stuttgart aufgenommen worden.

unsymmetrische Spannungskurven in Bezug auf eine vertikale Achse, d. h. es können die geraden harmonischen Glieder ($2\,\alpha$, $4\,\alpha$) nennenswerte Grössen annehmen, die sonst vernachlässigbar klein sind[1]). Diese Variation des magnetischen Widerstandes kann durch Verwendung von tiefen und schmalen Nuten (Fig. 128) oder von halbgeschlossenen Nuten (Fig. 129) oder durch starke Unterteilung, d. h. Verwendung zahlreicher Nuten verschwindend klein gemacht werden.

§ 41. Bestimmung der Kurvenform.

Steinmetz giebt in seinem Werke „Alternating Current Phenomena" an, dass die Spannungskurven von Drehstrommaschinen mit vielen Nuten, also

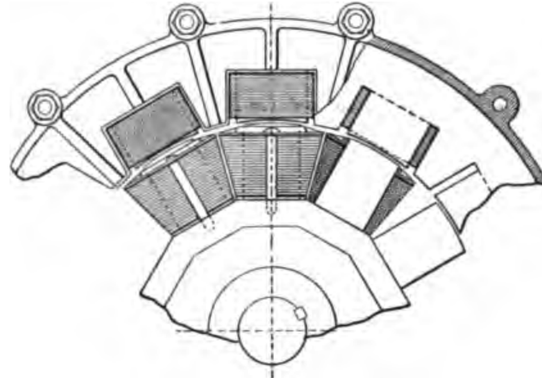


Fig. 128.

mit stark ungeteilter Wicklung sehr nahe sinusförmig verlaufen, Fig. 130 bei Leerlauf, bei Volllast ist der Verlauf ganz ähnlich. Wird nur eine Nute pro Pol und Phase verwendet, so stellen sich grosse Abweichungen von der Sinusform ein. Steinmetz nimmt an, dass der Kraftlinienverlauf bei b Nuten pro Pol darzustellen ist durch die Beziehung

$$K_t = K \cos \omega t \{1 + \varepsilon \cos [2 b \omega t - \varphi]\}. \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

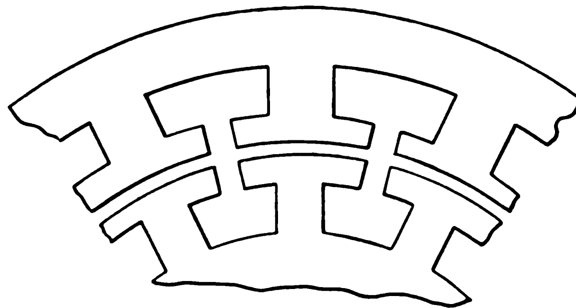


Fig. 129.

Daraus folgt dann eine elektromotorische Kraft

$$e = c n Z K \{\sin \omega t + \varepsilon \frac{2b-1}{2} \sin [(2b - 1) \omega t - \varphi]$$
$$+ \varepsilon \frac{2b+1}{2} \sin [(2b + 1) \omega t - \varphi]. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

1) Besonders die Gleichpol-Induktortype zeigt diese Unsymmetrie in den Phasenspannungen.

Für eine Einphasenmaschine mit **einer** Nute pro Pol ist also ein ausgesprochenes drittes harmonisches Glied zu erwarten. Thatsächlich findet sich auch für diesen Fall der Verlauf Fig. 131, der sich darstellen lässt durch

$$e = E\{\sin\beta - 0{,}242 \sin(3\beta - 6{,}3^0) - 0{,}046 \sin(5\beta - 2{,}6^0) + 0{,}068 \sin(7\beta - 3{,}3^0) - 0{,}027 \sin(9\beta - 10{,}0^0) - 0{,}018 \sin(11\beta - 6{,}6^0) + 0{,}029 \sin(13\beta - 8{,}2)\}.$$

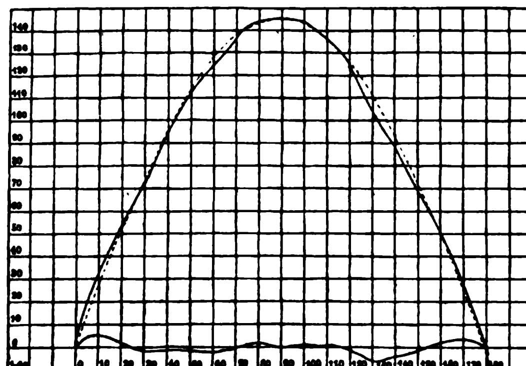


Fig. 130.

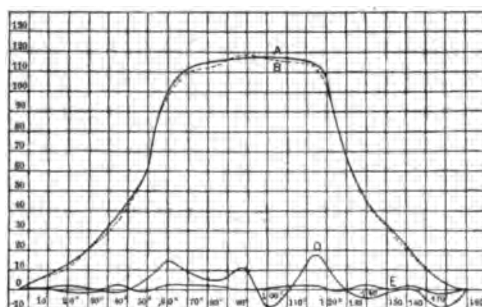


Fig. 131.

Bei einer Dreiphasenmaschine mit **einer** Nute pro Pol und Phase ist ein ausgesprochenes fünftes und siebentes harmonisches Glied zu erwarten. Es findet sich in Wirklichkeit die Fig. 132, die darzustellen ist durch

$$e = E\{\sin\beta - 0{,}12 \sin(3\beta - 2{,}3) - 0{,}23 \sin(5\beta - 1{,}5) + 0{,}134 \sin(7\beta - 6{,}2) - 0{,}002 \sin(9\beta + 27{,}7) - 0{,}046 \sin(11\beta - 5{,}5) + 0{,}031 \sin(13\beta - 61{,}5)\}.$$

Pichelmeyer hat neuerdings in E. T. Z. 1899 S. 697 ebenfalls nachgewiesen, dass bei allen vielnutigen Dreiphasenstromgeneratoren die Spannungskurven, soweit sie nicht durch andere mit solchen Maschinen in Verbindung laufenden Maschinen beeinflusst werden, im Leerlauf und bei Belastung mit ziemlich grosser Genauigkeit als Sinuswellen aufgefasst werden können.

Bragstad hat in E. T. Z. 1900, S. 252, folgenden interessanten Satz niedergelegt:

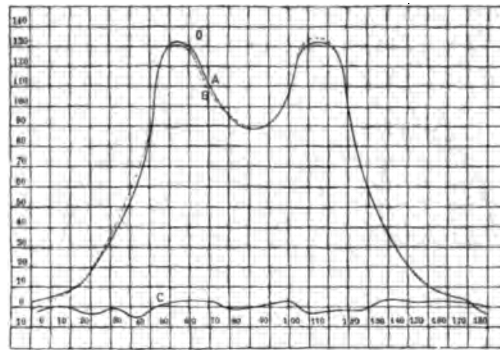


Fig. 132.

Es können in einem Drehstrome alle harmonischen Glieder höherer Periodenzahl auftreten, mit Ausnahme derjenigen, deren Periodenzahl ein Dreifaches oder ein durch drei teilbares Vielfaches der Grundschwingung ist. In den Phasenspannungen können natürlich die genannten Oberschwingungen auftreten, aber in den verketteten Spannungen heben sie sich auf oder geben sie zu Ausgleichsströmen Veranlassung.

7. Vor- und Nachteile verschiedener Kurvenformen.

Die Vor- und Nachteile spitzer und flacher oder sinusförmiger Kurven sind der Gegenstand vieler Untersuchungen geworden und thatsächlich ist auch keine Kurvenform für alle praktischen Fälle gleich günstig. Die spitze Kurve empfiehlt sich besonders für Transformatorenbetriebe. Auf gleichen effektiven Wert bezogen sind nämlich die Hysteresisverluste und der Magnetisierungsstrom kleiner als bei flachen Kurven. Es soll sich § 42. Einfluss verschiedener Kurvenform.

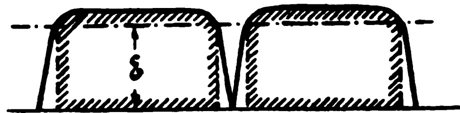


Fig. 133.

jedoch ein grösserer Spannungsabfall einstellen und namentlich muss durchweg bei spitzen Kurven des grösseren Maximalwertes halber die Isolation stärker sein als bei flachen. Für den Wirkungsgrad des elektrischen Lichtbogens sind flache Kurven am günstigsten. Für Motorenbetriebe scheinen bis jetzt sinusähnliche Kurven am vorteilhaftesten. Für Kabelnetze mit grosser Kapazität können die oberen Schwingungen der Spannungskurve sehr verhängnisvoll werden, da dieselben durch die Kapazität verstärkt werden und zu Resonanz- oder Konsonanzerscheinungen Veranlassung geben können, die unter Umständen Spannungserhöhungen hervorrufen gleich einem mehrfachen der Maschinenspannung. Für Gleichrichter zum Laden von Akkumulatoren, die allerdings bis jetzt wenig Verbreitung gefunden haben, empfehlen sich recht flache Kurven (Fig. 133), da bei einer gegebenen gegenelektromotorischen Kraft E der zu ladenden Akkumulatoren in diesem Falle

ein grösserer Teil der gleichgerichteten Wechselstromwelle nutzbar wird als bei spitzerer Form (Fig. 134). Es sind neuerdings Wechselstrommaschinen patentiert worden, wobei zu genanntem Zwecke zwei gleichgerichtete Wellen

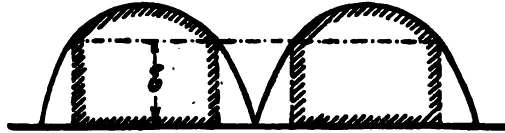


Fig. 134.

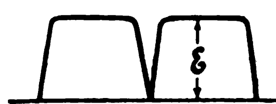


Fig. 135.

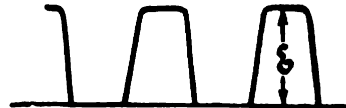


Fig. 136.

Fig. 135 u. 136 übereinander gelagert werden. Die Welle rechts fällt genau zwischen die Hauptwelle links.

8. Schaltung der Wechselstromwicklungen.

§ 48. Hintereinander- u. Parallelschaltung.

Die Freiheit in Beziehung auf die Schaltung der Windungen und Spulen ist bei Wechselstrom viel grösser als bei Gleichstrom, da man nicht in der ausgesprochenen Weise wie bei Gleichstrom an einen bestimmten Wickelschritt gebunden ist, wo namentlich auch der Kollektor und die dort auftretende Funkenbildung bestimmte Grenzen für die Windungszahlen vorschreiben. Eine Wechselstromwicklung mit reiner Parallelschaltung ist in Fig. 137 skizziert, eine solche in Hintereinanderschaltung in Fig. 138. Die

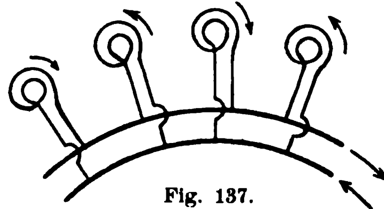


Fig. 137.

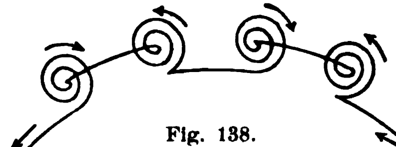


Fig. 138.

Parallelschaltung, die bedingt, dass induzierte Spulen, welche verschiedenen Polen angehören, auf eine Sammelschiene arbeiten, hat dieselben Nachteile, die von Gleichstrommaschinen her bekannt sind: Es können bei verschiedener Feldstärke in den einzelnen Magnetfeldern ungleiche elektromotorische Kräfte erzeugt werden, was innere Ausgleichsströme veranlasst und den Wirkungsgrad vermindert und die Erwärmung erhöht. Bei Drehstrom können solche Ausgleichsströme auch bei Dreieckschaltung[1]), überhaupt bei geschlossener Schaltung auftreten. Es lässt sich auch je nach der ge-

---

1) Bei Dreieckschaltung sind innere Ausgleichsströme unvermeidlich, wenn die Phasenspannungen Oberschwingungen enthalten, deren Periodenzahl ein durch drei teilbares Vielfaches der Grundschwingung ist, s. BRAGSTAD E. T. Z. 1900, S. 253.

wünschten Spannung eine Parallelschaltung einer Reihe hintereinandergeschalteter Spulengruppen ausführen. Zwei parallele Zweige zeigt die Fig. 30. Es ist zweckmässig, in der Wicklung womöglich eine Art Reihenparallelschaltung anzustreben, d. h. nur so parallel zu schalten, dass alle parallelen Gruppen gleichmässig allen Polen angehören. Unbequem zeigt sich die Parallelschaltung, auch schon eine teilweise, wenn nur einzelne Pole mit einer Serienerregung zur Compoundierung versehen werden sollen. MORDEY schlug seinerzeit für Wechselstrommaschinen mit parallelgeschalteten Abteilungen eine Ausgleichsvorrichtung in Form einer Drosselspule vor, wodurch er bespielsweise die Stromdifferenz in den verschiedenen Zweigen von 16 auf $^1/_2$ Ampère reduzierte. Statt in jeden der parallel geschalteten Zweige eine getrennte Drosselspule zu setzen, kann man auch eine Art Transformator vorsehen, der bei dem Übersetzungsverhältnis 1 : 1 soviele Wickelsysteme trägt, als parallelgeschaltete Zweige vorhanden sind.

9. Induktionsgesetze.

Zur Bestimmung der Richtung der in einer Spule augenblicklich erzeugten elektromotorischen Kraft können nachstehende Regeln dienen: § 44. Induktionsgesetze.

1. Nimmt die eine Spule durchsetzende Kraftlinienzahl zu, so entsteht in derselben eine elektromotorische Kraft im Uhrzeigersinn, falls man sie in der Kraftlinienrichtung betrachtet.

2. Für einen in einem Felde bewegten Leiter gilt: Kraftlinienrichtung K und Bewegungsrichtung V bilden ein rechtwinkliges, räumliches Koordinatensystem, dessen dritte Koordinate die Richtung der elektromotorischen Kraft E ist (Fig. 139). Es lässt sich dieses Bild stets durch die drei ersten Finger der rechten Hand veranschaulichen. Der Daumen zeigt die Geschwindigkeit, der Zeigefinger die Kraftlinienrichtung und der dritte Finger die elektromotorische Kraft. Die Kraftlinienrichtung ist dabei dadurch definiert, dass die Kraftlinien aus einem Nordpol austreten und zum Südpol zurückkehren, um innerhalb des Magneten wieder den Nordpol zu erreichen.

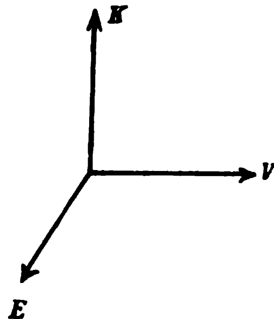
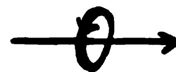


Fig. 139.



Fig. 140.


Fig. 141.

3. Ein Solenoid oder ein Elektromagnet hat seinen Nordpol auf der Seite, von wo aus gesehen der erregende Strom gegen den Uhrzeigersinn verläuft (Fig. 140); oder: Nimmt man ein Solenoid derart in die rechte Hand, dass der Strom in der Richtung von vier Fingern fliesst, so giebt der Daumen die Richtung der Kraftlinien.

4. Um die Feldrichtung circular um einen Stromleiter zu finden, denke man sich denselben mit der rechten Hand gepackt; fliesst der Strom in Richtung des Daumens, so folgt das Feld der Richtung der übrigen Finger (Fig. 141).

10. Zusammengesetzte elektromotorische Kräfte.

§ 45. E. M. K. hintereinandergeschalteter Spulen.

Sind die Windungen einer Spule bezw. hintereinandergeschaltete Spulen räumlich gegeneinander versetzt, so haben die einzelnen Wechselspannungen ungleiche Phase; es ist dann nicht angängig, zur Auswertung der Gesamtspannung die Einzelspannungen algebraisch zu addieren, sondern es geschieht dies entweder durch Addition der einzelnen phasenverschobenen Sinusschwingungen oder, falls man die einzelnen Schwingungen bezw. deren Effektivwerte als Vectoren darstellt, durch graphische Zusammensetzung derselben nach einem Parallelogramm bezw. Dreieck Fig. 142 oder aber bei vielen einzelnen Werten nach einem Polygon Fig. 143. Analytisch lässt sich die

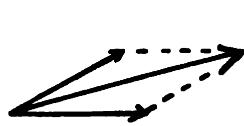


Fig. 142.

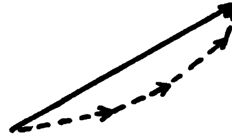


Fig. 143.

elektromotorische Kraft einer Spule von z Windungen, die gleichmässig auf einen Winkelraum 2ψ verteilt wird, ermitteln durch den Ausdruck:[1])

$$\frac{z}{p\psi}\int_0^{p\psi} e \cdot \cos\gamma \cdot d\gamma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

$p\psi$ ist der Phasenunterschied des äussersten Spulendrahtes gegenüber der Spulenmitte ($2p$-Pole!) und γ ist der Phasenunterschied irgend eines zwischenliegenden Drahtes. ψ bedeutet das Verhältnis halbe Spulenbreite: Halbmesser der Maschine.

Ein Auseinanderbreiten der Spulen verringert also in jedem Falle die gesamte elektromotorische Kraft. Aber dieselbe lässt sich, falls der Umfang der Maschine vollständig ausgenützt werden soll, nicht vermeiden. Namentlich bei Einphasenmaschinen ist die Ausnützung aus diesem Grunde sehr ungünstig.

11. Mehrphasenwicklungen.

§ 46. E. M. K. von Mehrphasensystemen.

Die eben erwähnte Verschiebung der räumlich verteilten Spulen wird bei dem Bau der sogenannten Mehrphasenmaschinen ausgiebig benützt. Denkt man sich zwei senkrecht aufeinandergestellte Spulen, die in einem zweipoligen Felde rotieren, so entstehen zwei Wechselspannungen, die in der Phase um 90^0 verschoben sind (Fig. 144):

$$E_{max} \sin(2\pi n t) \text{ und } E_{max} \sin\left(2\pi n t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Ordnet man drei Spulen, die um 120^0 versetzt sind, an, so erhält man drei Spannungen, die je um eine Drittelperiode gegen einander verschoben sind (Fig. 145):

$$E_{max} \sin(2\pi n t),\ E_{max} \sin\left(2\pi n t + \frac{2\pi}{3}\right) \text{ und } E_{max} \sin\left(2\pi n t + \frac{4}{3}\pi\right).$$

1) Mehrphasige elektrische Ströme von S. Thompson.

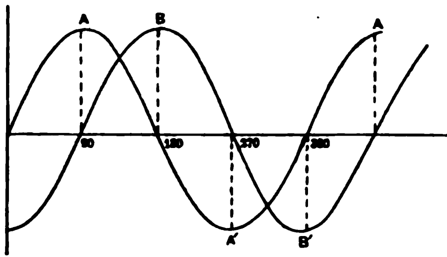


Fig. 144.

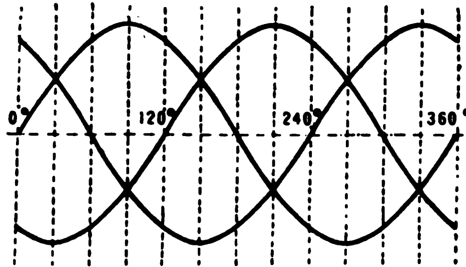


Fig. 145.

Die erste Anordnung (Fig. 146) heisst eine Zweiphasenmaschine, die zweite (Fig. 147) eine Dreiphasenmaschine. Die Dreiphasenwicklungen können in verschiedener Weise angeordnet werden. Die drei einzelnen Phasen lassen sich nach Fig. 148 u. 149 hintereinander zu einem Dreieck schalten: Dreieck- oder geschlossene Schaltung. Man kann aber auch die drei Phasen Fig. 147 u. 150 in einem Punkte vereinigen und die drei Enden nach

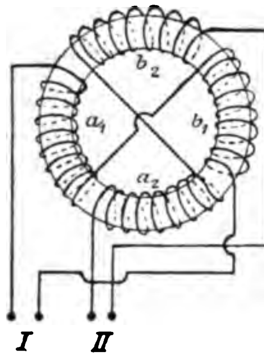


Fig. 146.

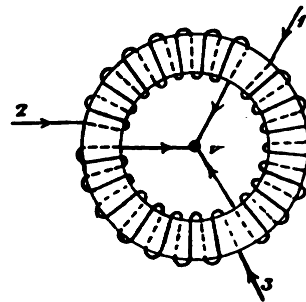


Fig. 147.

aussen führen: Sternschaltung oder verkettete Schaltung. Bei letzterer Schaltung wird gemäss Fig. 150 häufig auch eine Leitung vom Verkettungspunkt *V* nach aussen gezogen. Die Fig. 151 zeigt eine in Stern verkettete zweipolige Dreiphasenwicklung, bei der jede Phase aus zwei Spulen besteht, die sich auf dem Ringe gegenüberliegen.

Ist die elektromotorische Kraft der zwei Spulen a_1 und b_1 Fig. 146 je $E_{max} \sin \alpha$, diejenige der zwei anderen a_2 und b_2 je $E_{max} \cos \alpha$, so herrscht

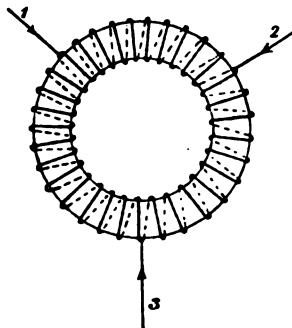


Fig. 148.

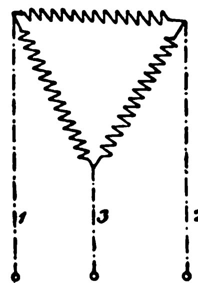


Fig. 149.

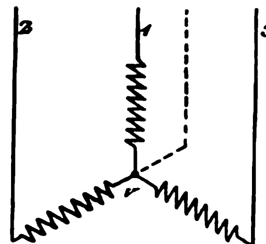


Fig. 150.

an den Klemmen *I* und *II* die Spannung $2\ E_{max} \sin a$ und $2\ E_{max} \cos a$. Zwischen einer Klemme *I* und einer *II* stellt sich (Fig. 152) eine Spannung

$$E_r = \sqrt{2\,E^2_{max}}\,\sin(a+45^0) = \sqrt{2}\cdot E_{max}\sin(a+45^0)$$

ein. Für die geschlossene Zweiphasenschaltung Fig. 153 gilt dasselbe. Die verkettete Spannung E_r ist besonders dann von Interesse, wenn bei Zwei-

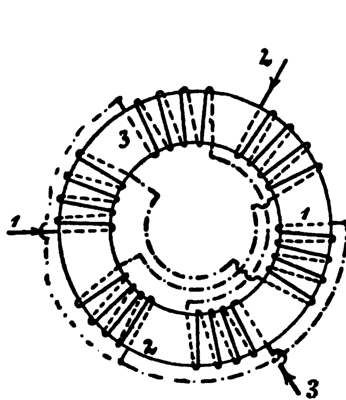


Fig. 151.

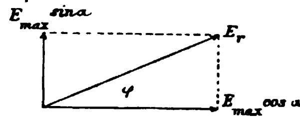
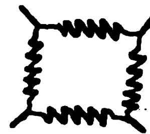


Fig. 152.


Fig. 153.

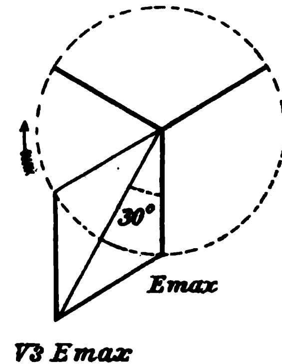


Fig. 154.

phasenübertragungen eine gemeinsame Rückleitung, also nur drei statt vier Leitungen benützt werden.

Bei Sternschaltung Fig. 150 findet sich nach Fig. 154 als Spannung [1]) zwischen zwei Leitungen $\sqrt{3}\,E_{max}\sin(a+30^0)$ und schliesslich bei der Schaltung Fig. 155 eine solche von $2\,E_{max}\sin(a-60^0)$. E_{max} gilt immer pro Spule (ev. Phase).

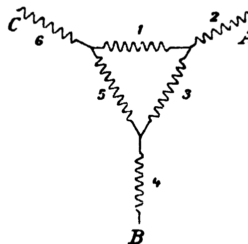
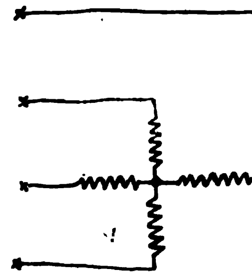


Fig. 155.


Fig. 155 a.

Zur Erzeugung von Zweiphasenströmen lassen sich die Wicklungen auch nach Fig. 155a in Sternschaltung anordnen. Vom Verkettungspunkt kann eine Leitung abgehen. Die Spannung zwischen zwei Aussenleitungen ist $\sqrt{2}\cdot E_{max}\sin(a+45^0)$.

---

1) Wie BRAGSTADT in E. T. Z. 1900 S. 252 angiebt, wird die Beziehung $E_l = \sqrt{3}\,E_p$ (verkettete Spannung $= \sqrt{3} \times$ Phasenspannung) bei Abweichung von der Sinusform erheblich unrichtig, wenn die Phasenspannung Oberschwingungen enthält, deren Periodenzahl ein durch 3 teilbares Vielfaches der Grundschwingung ist. Er giebt ein Beispiel, worin der Fehler 4 Proc. beträgt.

Das von STEINMETZ angegebene monocyklische System besteht aus einer Hauptwicklung H Fig. 156 und einer senkrecht dazu liegenden Nebenwicklung N. Ist die Spannung zwischen zwei Aussenleitern E_{max} sin α und diejenige der Nebenspule E'_{max} cos α, so ergiebt sich für die Spannung zwischen einer Aussenleitung und der Mittelleitung der Wert (Fig. 157).

$$\sqrt{\frac{E^2_{max}}{4}\sin^2\alpha + E'_{max}\cos^2\alpha} = \sqrt{\frac{E^2_{max}}{4} + E'^2_{max}}\cos\left\{\alpha + \operatorname{arc\,tg}\frac{E_{max}}{2\,E'_{max}}\right\}.$$

Eine p'-Phasenmaschine erzeugt Phasenspannungen:

$$E_{max}\sin(2\pi n t),\; E_{max}\sin\left(2 p n t + \frac{2\pi}{p'}\right), \ldots E_{max}\sin\left(2\pi n t + \frac{2\pi(p'-1)}{p'}\right).$$

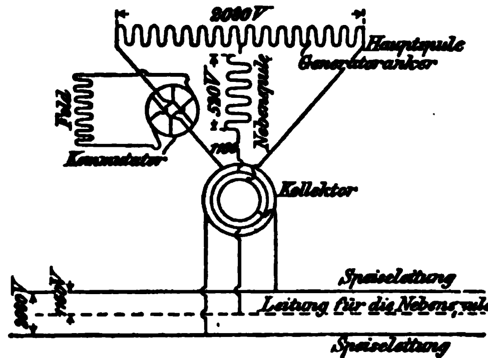


Fig. 156.

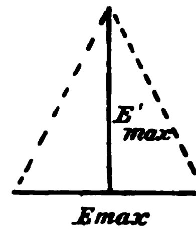


Fig. 157.

Mehrphasensysteme können, ganz allgemein aufgefasst, symmetrisch oder unsymmetrisch und andererseits verkettet (Fig. 147 u. 148) und unverkettet (Fig. 146) sein. Symmetrisch ist ein Mehrphasensystem nur, wenn die Verschiebung der p'-Phasen je ein $1/p'$ der Periode beträgt.

Ein ganz allgemeines verkettetes Mehrphasensystem ist in den Figg. 158 u. 159 skizziert. Ersteres ist sternverkettet (offen), letzteres zeigt Ringverbindung (geschlossen). Beide sind jedoch verkettet. STEINMETZ giebt in seinem Werke „Alternating Current Phenomena" einen ganz allgemeinen Ausdruck für die Spannung zwischen zwei aufeinander folgenden Leitungen, der m_{ten} und $(m+1)ten$ eines p'-Phasensystems, bei Sternverkettung

$$\varepsilon^m(\varepsilon - 1)\,E_{max}$$

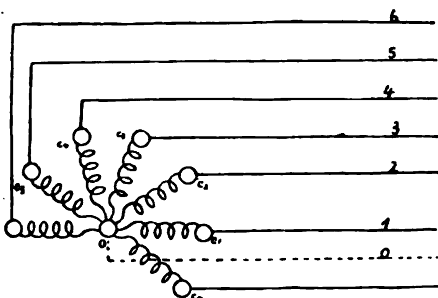


Fig. 158.

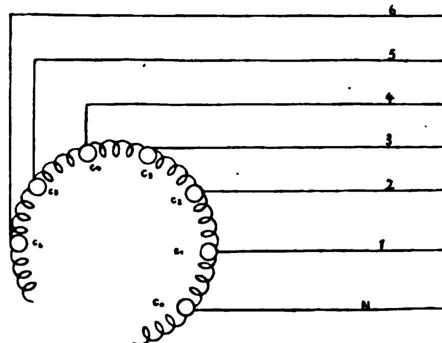


Fig. 159.

und bei Ringverkettung

$$\varepsilon^m \cdot E_{max},$$

wobei $\varepsilon = \cos\frac{2\pi}{p'} + j\sin\frac{2\pi}{p'} = \sqrt[n]{1}$ und E_{max} die maximale Phasenspannung ist. Es ist hierbei mit komplexen Grössen gerechnet. Der Ausdruck $a + bj$ ist so aufzufassen, dass a ein bestimmt gerichteter Vektor ist, während b senkrecht zu a steht.

12. Gleichstromwicklungen für Wechselstrom.

§ 47. Verhältnis von Gleich- und Wechselspannungen.

Den bekannten geschlossenen Wicklungen für Gleichstromanker lassen sich in einfachster Weise Wechselströme beliebiger Phase entnehmen. Es handelt sich im allgemeinen dabei um Ringverbindungen. Verbindet man zwei gegenüberliegende Punkte einer zweipoligen Ringwicklung (Fig. 160)

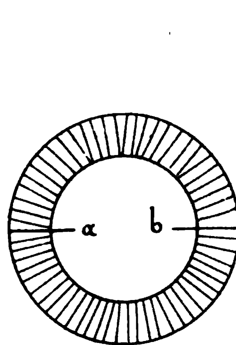


Fig. 160.

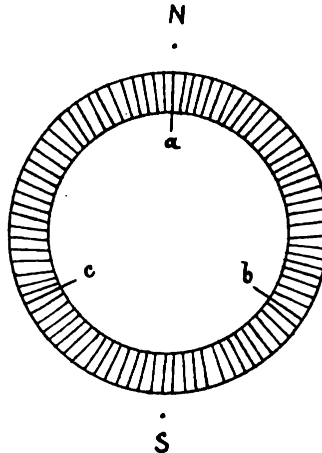


Fig. 162.

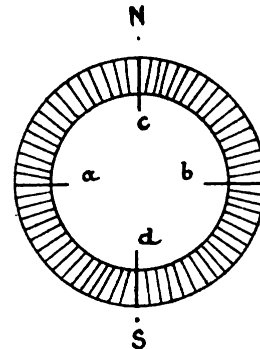


Fig. 161.

mit den Aussenleitungen, so bekommt man einphasigen Wechselstrom, bei vier Abnahmepunkten (Fig. 161) Zweiphasenstrom, bei deren drei (Fig. 162) Dreiphasenstrom und bei p'-Anschlusspunkten, die um $1/p'$ des Umfangs versetzt sind, p'-phasigen Strom. Die elektromotorische Kraft, die solche Maschinen bei Entnahme von Mehrphasenströmen liefern, steht nun in einem bestimmten Verhältnis zu der elektromotorischen Kraft E_g bei Gleichstromentnahme durch einen Kollektor. R. Friese hat diese Verhältnisse in E. T. Z. 1894, S. 89 ff., unter Voraussetzung von sinusförmigem Verlauf der Schwingungen in ausführlicher Weise niedergelegt. Für Einphasenstrom ist E_g der maximale Wert der Wechselspannung, also ist der effektive Wert $\frac{1}{\sqrt{2}} E_g = 0{,}707\, E_g$, für Zweiphasenströme erhält man zwei um 90^0 verschobene Wechselspannungen ebenfalls mit dem Effektivwert $0{,}707\, E_g$. Bezeichnet $E_{p'}$ irgend eine Phasenspannung bei p'-Phasen, so gilt bekanntlich, wenn Z_t die totale Leiterzahl ist,

$$E_{p'} = c\,n\,\frac{Z_t}{p'}\,K 10^{-8} \text{ und}$$

$$E_g = n\,Z_t\,K \cdot 10^{-8}$$

also

$$E_{p'} = \frac{c}{p'} E_g \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

Bei Sinusform ist $c = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$, also

$$E_{p'} = \frac{\pi}{p'\sqrt{2}} E_g = \frac{2{,}22}{p'} E_g \quad \ldots\ldots \quad (12)$$

FRIESE giebt die Beziehung[1])

$$E_{p'} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin\frac{\pi}{p'} E_g \quad \ldots\ldots\ldots \quad (13)$$

und konstruiert den Wert aus der Fig. 163.

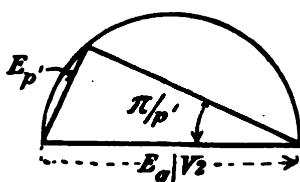


Fig. 163.

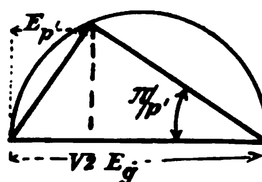


Fig. 164.

Das Verhältnis der verschiedenen elektromotorischen Kräfte ist nach dieser letzten Beziehung:

E_g	Einphasig	Dreiphasig	Zweiphasig	Sechsphasig	Zwölfphasig
1	0,707	0,612	0,500	0,354	0,183

Bei offen verketteter Schaltung (Sternschaltung Fig. 158) findet FRIESE:

$$E_{p'} = \sqrt{2} \sin^2\frac{\pi}{p'} E_g \quad \ldots\ldots\ldots \quad (14)$$

Diese Beziehung lässt sich mit Hilfe der Fig. 164 graphisch lösen.

13. Drehfelder.

Die Mehrphasenströme haben die Eigenschaft, dass sie beim Einleiten in eine Mehrphasenwicklung, die der Generatorwicklung principiell entspricht, ein sogenanntes Drehfeld erzeugen, d. h. ein Magnetfeld, das rotiert, und in seiner Wirkung völlig einem durch Gleichstrom erregten, rotierenden Polkranz entspricht. Auch im Generator selbst bilden die induzierten Ströme ein Drehfeld, das sich als Ankerrückwirkung zeigt. Im Gegensatz zu den einphasigen Wechselstromfeldern ist ein Drehfeld nicht oscillierender Natur, es behält bei symmetrischen Mehrphasenströmen seine Stärke dauernd bei und rotiert mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. Sind die einzelnen p'-Phasen § 48. Drehfelder.

1) Der Unterschied in den beiden Formeln rührt daher, dass in Gleichung 12 die Wicklung in einem Punkte konzentriert gedacht ist, während in Gleichung 13 die Ausbreitung der Spule bei Sinusform der elektromotorischen Kraft berücksichtigt ist.

nicht je um $1/p'$ der Periode verschoben oder sind die Phasenspannungen nicht gleich oder ist beides der Fall, so entsteht ein Drehfeld, das während einer Periode auf- und abwogt und auch nicht gleichförmig rotiert. Es wird dann durch eine Ellipse, nicht durch einen Kreis dargestellt. Sind die Ströme nicht sinusförmig, so wird das Drehfeld auch nicht kreisförmig, sondern nimmt den Verlauf Fig. 165 (spitze Stromkurve) oder Fig. 166 (flache Stromkurve) an, Zweiphasenströme vorausgesetzt.

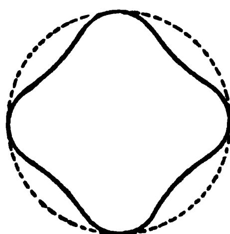


Fig. 165.

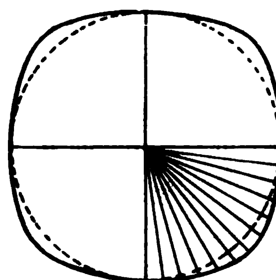


Fig. 166.

Die Grösse des Drehfeldes bei Zweiphasenstrom findet sich aus den zwei Wechselfeldern $K \sin a$ und $K \cos a$, die zu den elektromotorischen Kräften $E_{max} \cos a$ und $E_{max} \sin a$ gehören, zu

$$\sqrt{K^2 \sin^2 a + K^2 \cos^2 a} = K$$

und der Rotationswinkel φ

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{K \sin a}{K \cos a} = \operatorname{tg} a$$

d. h. φ ändert sich wie a gleichförmig.

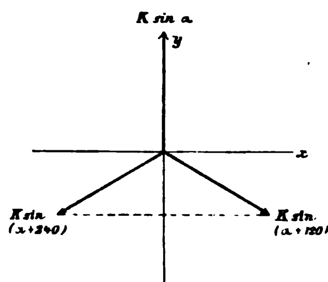


Fig. 167.

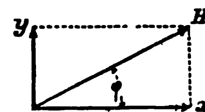


Fig. 168.

Für drei Felder $K \sin a$, $K \sin (a + 120^0)$ und $K \sin (a + 240^0)$ ergiebt sich an Hand der Fig. 167 eine X-Komponente (Fig. 168) $3/2 \cdot K \cos a$ und eine Y-Komponente $3/2\ K \cdot \sin a$, also als Resultierende

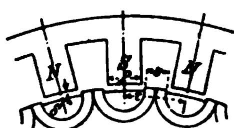
$$\sqrt{(3/2\ K \cos a)^2 + (3/2\ K \sin a)^2} = 3/2\ K, \text{ siehe } H \text{ in Fig. 168.}$$

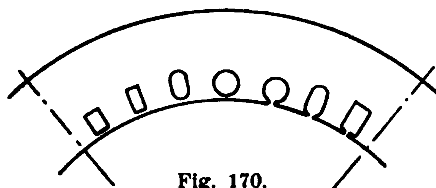
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{3/2\ K \sin a}{3/2\ K \cos a} = \operatorname{tg} a.$$

Ganz allgemein lässt sich für p'-Phasen ermitteln, dass dies Drehfeld $K_d = \frac{p'}{2} K$ wird, wenn K die Amplitude des Einzelfeldes ist.

14. Wicklungen für Wechselstrommaschinen.

In den Wicklungen für Wechsel- und Mehrphasenstrommaschinen herrscht § 49. Spulenanker. eine grosse Mannigfaltigkeit. Alle Gleichstromwicklungen sind auch für Wechselstrom möglich, aber nicht umgekehrt. Die Anordnung derselben ist durchaus nicht gleichgültig, dieselbe bedingt vor allem die Form und Grösse der induzierten elektromotorischen Kraft, die nicht, wie bisher vereinfachend angenommen, dem Sinusgesetz folgt.


Fig. 169.


Fig. 170.

Die Wicklung lässt sich in Form von aufgelegten Spulen (glatte Wicklung) (Fig. 169) ausführen, oder es werden die Leiter in Nuten verlegt (Fig. 172) (Nutenanker, Lochanker). Die Nuten können die verschiedensten Formen annehmen (Fig. 170), deren Bedeutung erst später erklärt werden wird. Der Ankerkern (Fig. 171) trägt Zackenwicklung. Für die Ermittlung der

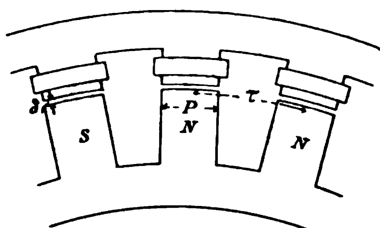
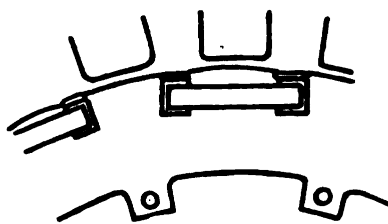


Fig. 171.


Fig. 172.

elektromotorischen Kraft bei einer bestimmten Wicklung ist die Ausdehnung der Spule, d. h. deren Breite *s*, bezw. die Zahl der Nuten, in denen eine Spule untergebracht ist, sowie das Verhältnis Polteilung τ: Polbreite *P* massgebend. In Fig. 169 u. 171 ist die Spulenbreite *s*, die Teilung τ und die Polbreite *P* eingezeichnet. Diese beiden Wicklungen dienen zur Erzeugung von Einphasenspannungen ebenso wie die Anordnung Fig. 172, worin auf

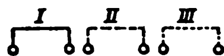


Fig. 173.

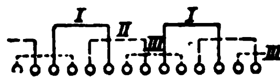


Fig. 174.

einen Pol je eine Spule entfällt; die Nuten, die eine Spule enthalten, sind parallel. Die Mehrphasenwicklungen lassen sich entweder nach Fig. 173 oder nach Fig. 174 aufbauen. Erste Anordnung wird als „kurze Spulen" gekennzeichnet, die Spulen, die zu Phase *I*, *II* und *III* gehören, liegen nebeneinander, ohne sich zu kreuzen. Die Fig. 174 stellt im Gegensatz dazu „lange Spulen" oder übergreifende Spulen dar, eine Spule umfasst die ganze Polteilung oder wenigstens nahezu die ganze, während in Fig. 173 erst drei

Spulen, bei p' Phasen deren p' die Teilung einnehmen. Die langen Spulen sind weitaus die üblicheren: In Fig. 175 u. 176 ist z. B. die Wicklung der Innenpolmaschine von SIEMENS & HALSKE gezeichnet, die erste Figur gilt für Einphasenströme, wobei die dritte Nute immer frei bleibt, die zweite für Dreiphasenströme. Pro Spule bezw. pro Pol und Phase ist eine grosse,

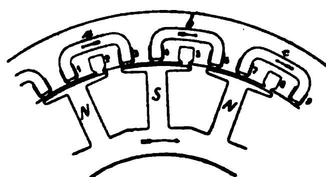


Fig. 175.

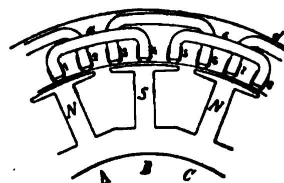


Fig. 176.

rechteckige Nute, die etwa halb geschlitzt ist, vorhanden. Da die Nuten gegenüber den Zähnen verschwindend wenig Kraftlinien führen, kann bei solchen Nutenwicklungen mit einer Nute pro Spulenseite die Spulenbreite $s = o$ gesetzt werden. Ein ganzes Schema einer solchen Wicklung zeigt Fig. 177.

§ 50. Besondere Spulenköpfe. Bei grossen Maschinen wird es erforderlich, eine Teilung horizontal auszuführen, sodass die obere Hälfte abgenommen werden kann. Bei den ge-

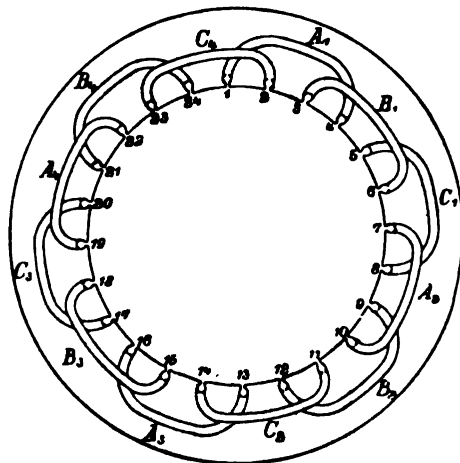


Fig. 177.

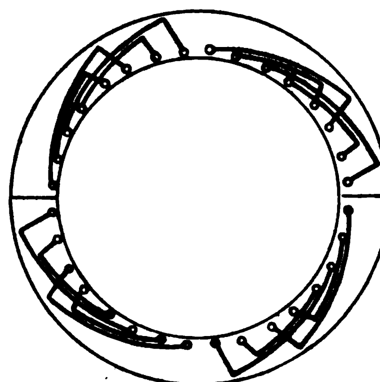


Fig. 178.

wöhnlichen Wicklungssystemen müssen zu diesem Zwecke mindestens zwei oder gar vier Spulen ausgewickelt werden. Durch die Schaltung Fig. 178 — achtpoliger Zweiphasen-Zweilochanker — ist nach KAPP eine Trennung ohne weiteres möglich.[1]) Die für die Spulenköpfe nötige Drahtlänge wird allerdings grösser als bei der üblichen Ausführung.

Sechs- und zehnpolige Wicklungen zeigen im Gegensatz zu vier- und achtpoligen bei der Ausführung nach Fig. 174 stets eine Unregelmässigkeit, die in Fig. 179[2]) zu erkennen ist.

1) KAPP, Dynamomaschinen, S. 306; ebenso Fig. 169 und 171.
2) KAPP, Elektromechanische Konstruktionen.

Um bei Hochspannung die Gefahr zu vermeiden, dass gleich lange Isolationsrohre der Spulen nebeneinander zu liegen kommen, wie in Fig. 174, wo immer zwei lange Spulenenden und dann zwei kurze aneinanderstossen, was ein Überschlagen begünstigt, wickelt die A. E. G. in solchen Fällen nach

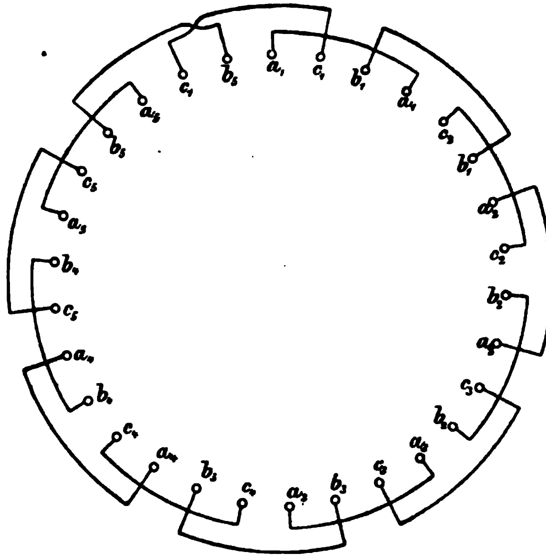


Fig. 179.

Schema Fig. 180, in dem benachbarte Phasen durchweg verschiedene Länge haben; es kommt dann immer ein langes Rohr neben ein kurzes. Die erste Wicklung hat indes nur *eine* eigentliche Kröpfung, während die letztere deren viele hat.

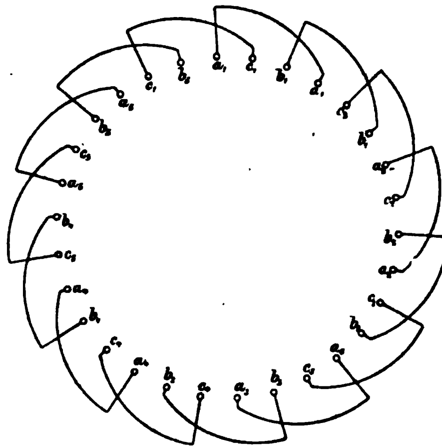


Fig. 180.

Die vom Gleichstrom her bekannten Anordnungen, die Wellenwicklung und die Schleifenwicklung, sind auch für Wechselstrom ausführbar, erstere ist in Fig. 181, letztere in Fig. 182 dargestellt. Die Schlangenwicklung Fig. 183 hat für Hochspannung den Vorteil, dass sie keine Kreuzungs- § 51. Wellen- und Schleifenwicklung.

punkte aufweist. Wenn die Spulenzahl gleich der Polzahl ist, sind aufeinanderfolgende Spulen in umgekehrtem Sinne zu verbinden (Fig. 184), wenn die Spulenzahl gleich der halben Polzahl ist (Fig. 185), werden alle Spulen in gleichem Sinne verbunden. Bei Hintereinanderhaltung aller Spulen tritt

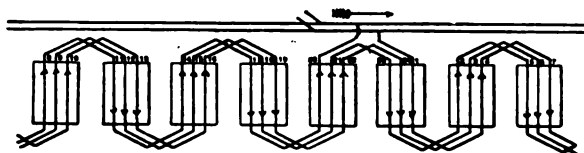


Fig. 181.

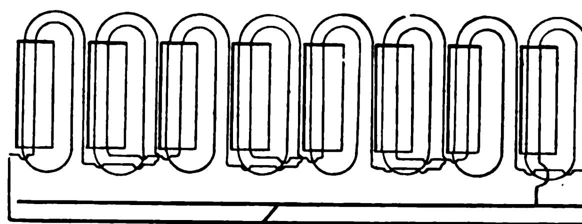


Fig. 182.

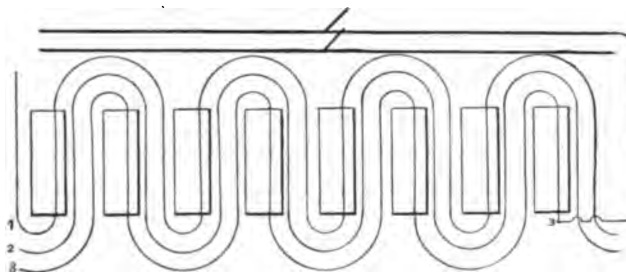


Fig. 183.

zwischen der ersten und letzten Spule die volle Spannungsdifferenz auf, weshalb bei Hochspannung dazwischen gute Isolation vorzusehen ist. Zwischen den übrigen Spulen herrscht nur geringe Spannung. Bei der Parallelschaltung (Fig. 30) in zwei Hälften ist dieser Übelstand beseitigt. Übrigens werden

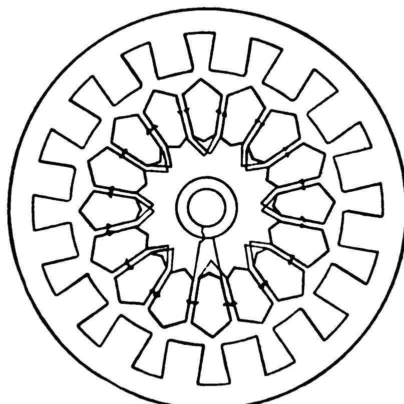


Fig. 184.

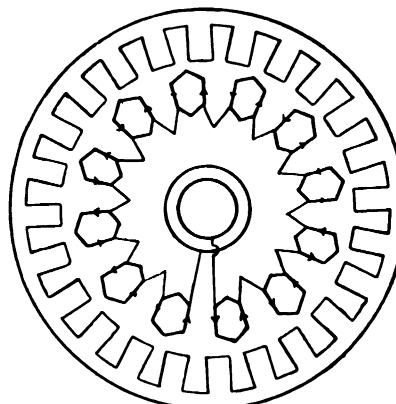


Fig. 185.

die heutzutage üblichen Nutenanker bei Hochspannung mit Mikanitröhren ausgefüttert, die die volle Spannung auf die Dauer ertragen.

§ 52. Geschlossene Wicklungen.

Die geschlossenen Gleichstromwicklungen in Trommel- oder Ringform[1]) sind schon durch die Figg. 160—162 erläutert. Es sind ein- und mehrphasige Ringanker gezeichnet. Bei der einphasigen Wicklung ist die Spulenbreite s

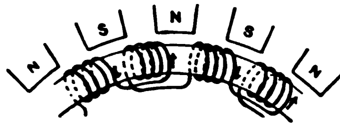
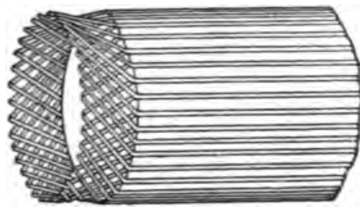
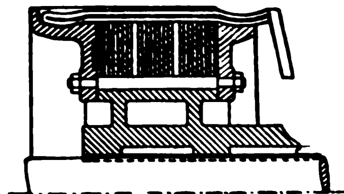


Fig. 186.

$=$ der Teilung τ. Bei mehrpoligen Maschinen sind die Anschlusspunkte für die Schleifringe nur um einen Winkel versetzt, der $1/p$ mal kleiner ist als bei zweipoligen. In dem Dreiphasenanker (Fig. 162) ist die Spulenbreite $s = 2/3\ \tau$. Eine etwas andere Anordnung der Spulen eines Gleichstromring-

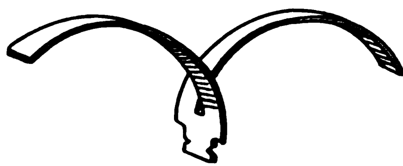

Fig. 187.

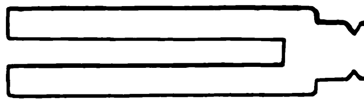

Fig. 188.

ankers ist in Fig. 186 für Einphasenstrom niedergelegt; die Spulen sind in umgekehrtem Sinne verbunden.

§ 53. Stabwicklung. Schleichende Wicklung.

Bei Stabwicklungen erhält häufig der Ankerkern so viele Löcher als wirksame Stäbe; es liegt dann in jedem Loch ein Stab; die Verbindungsköpfe können gerade wie bei Gleichstromtrommelankern entweder in Cylinderform, Fass- oder Mantelwicklung (Fig. 187 u. 188), oder als Bügel in einer


Fig. 189.


Fig. 190.

Ebene senkrecht zur Achsrichtung (Fig. 189 u. 190), Seitenwicklung, ausgeführt werden. Die letztere Verbindung mit Gabeln liefert sogenannte Anker mit Gabelköpfen, die andere solche mit Gitterköpfen. Die Mantelwicklung kann entweder mit symmetrischen Köpfen (Fig. 191) oder mit unsymmetrischen

---

1) Ringwicklung, die gewöhnlich ohne Nuten ausgeführt wird, verlangt mehr Draht als Trommelwicklung, auch die Selbstinduktion (Streuung) ist grösser. Flachringe kühlen sehr gut. Scheibenanker können entweder aus einzelnen Spulen oder aus einer fortlaufenden Wicklung bestehen.

(Fig. 192) ausgeführt werden. Eine schleichende Stabwicklung für dreiphasige Sternschaltung als vierpolige Trommel ist in Fig. 193 gezeichnet. Ist y der Wickelschritt, bezw. das Mittel aus dem Wickelschritt vorn und hinten, und Z die Anzahl Stäbe pro Phase, so gilt die Beziehung: (Kapp)

$$3\,Z = 2py \pm 2$$

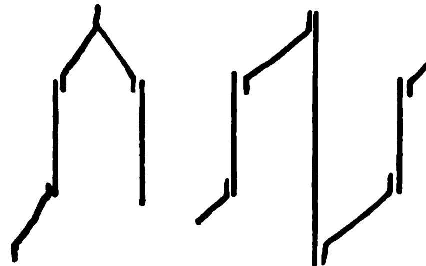


Fig. 191. Fig. 192.

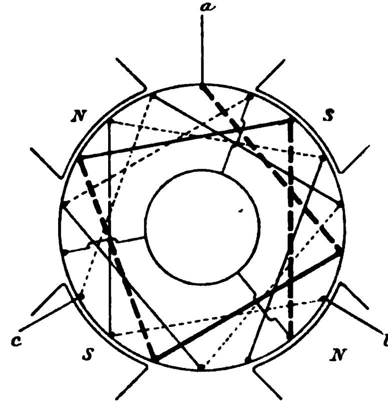


Fig. 193.

Der längs des Umfangs zurückgelegte Weg pro Phase ist

$$\tau Z \mp 2/3\,\tau$$

d. h. die Wicklung schleicht pro Phase um $2/3\,\tau$ vor- oder rückwärts.

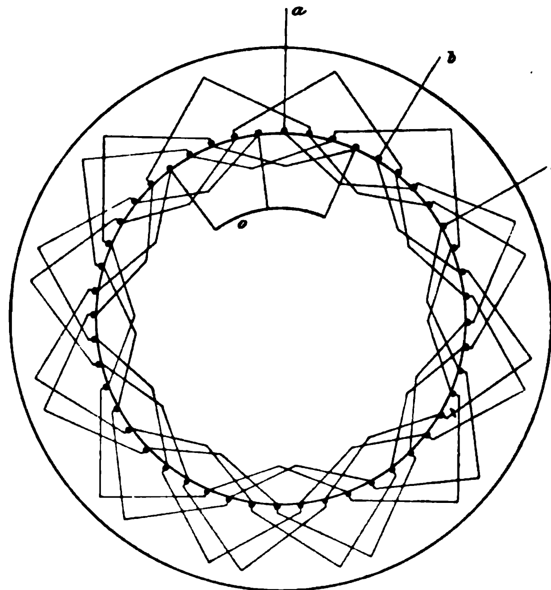


Fig. 194.

Eine symmetrische Stabwicklung erhält man, wenn man die Anzahl Stäbe pro Phase gleich einem Vielfachen der Polzahl macht: Das achtpolige Schema Fig. 194 enthält im ganzen $3\,Z = 48$ Stäbe und zwar $q = 2$ pro Pol und Phase, also $3\,Z = q \cdot 3 \cdot 2p$. Ist a der Lochabstand, so ist die

sogenannte Spulenbreite (Breite einer Stabgruppe): (q—1) *a*. Auf der Rückseite des Ankers sind sämtliche Verbindungsgabeln gleich lang, während auf der dargestellten Wicklungsseite eine Reihe abnormaler Verbindungsgabeln notwendig werden und zwar längere und kürzere. Diese dienen

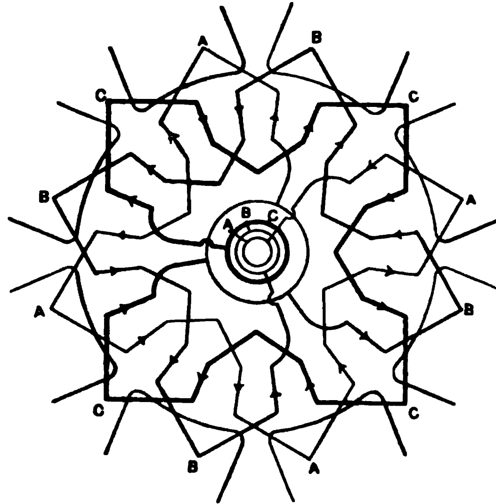


Fig. 195.

dazu, den Übergang von einer Umkreisung des Ankers zur anderen zu bilden. Bei einem Stabe pro Pol und Phase werden diese abnormalen Verbindungsstücke, von den Schleifringzuleitungen abgesehen, in der Regel nicht erforderlich, wie dies aus den Schemata Fig. 195 u. 196 zu ersehen ist.

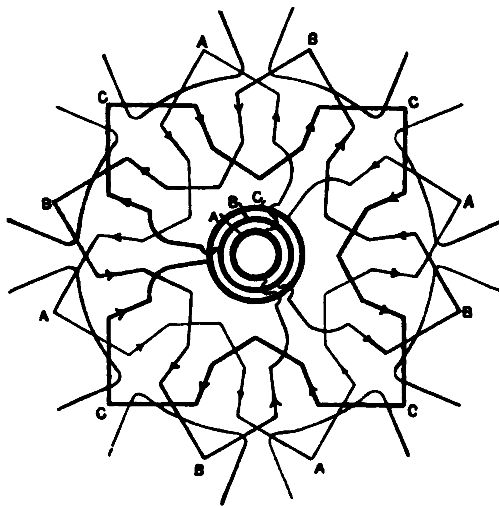


Fig. 196.

Ersteres ist eine achtpolige sternverkettete, letzteres eine in Dreieck verbundene Wicklung. In Fig. 194 läuft die Wicklung immer im gleichen Sinn durch den Anker, man kann jedoch auch, wie in Fig. 197, bei mehreren Stäben pro Pol und Phase zunächst in einem Sinn wickeln und nach einem

Umlauf den Wickelsinn umkehren, an der Stelle, wo diese Umkehr stattfindet, werden stets abnormale Bügel erforderlich. Die Fig. 197 unterscheidet sich noch insofern von der Fig. 194, als die Ausführungen zu den Schleifringen und dem Verkettungspunkt mehr über den Umfang verteilt sind, was aus mechanischen Gründen zweckmässig erscheint, während in ersterer Figur die Ausführungspunkte so nahe als möglich beieinander liegen.

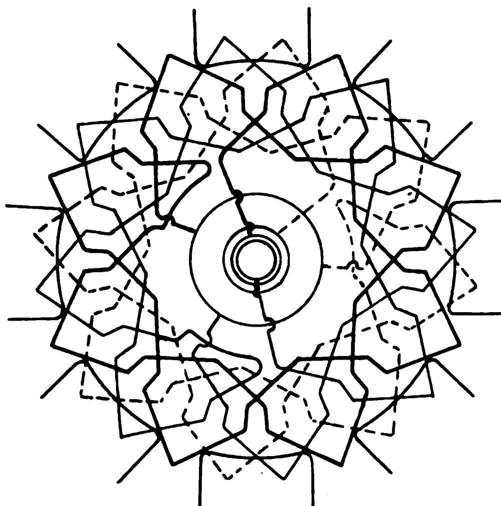


Fig. 197.

Die durch die Übertragung Lauffen-Frankfurt bekannt gewordene Maschine von Oerlikon hatte die Stabwicklung Fig. 198, es ist eine Wellenwicklung mit Sternverkettung.

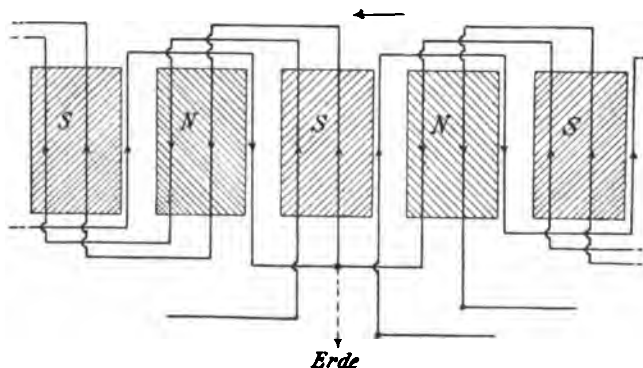


Fig. 198.

Eine sechspolige Schleifenwicklung ist in Fig. 199 gezeichnet. Sie ist dreiphasig und in Stern verkettet. Es sind pro Pol und Phase je fünf Stäbe. (Nur eine Spule ist voll gezeichnet.)

§ 54. Zweiphasenwicklungen. Für die Zweiphasenmaschinen sind principiell folgende drei Anordnungen möglich: 1) Fig. 200 mit kurzen Spulen. Die Spulenlänge ist etwa gleich der halben Teilung. 2) Fig. 201: Lange Spulen. Die Spulenlänge ist etwa gleich der Teilung. 3) Lässt sich jede Spule der Fig. 201 in zwei nach

links und rechts gebogene unterteilen: Fig. 202 eine Zweilochwicklung. Diese letzte Wicklung gleicht im Aussehen völlig der üblichen Dreiphasenwicklung. Eine Zweiphasenwicklung mit q Löchern pro Pol und Phase —

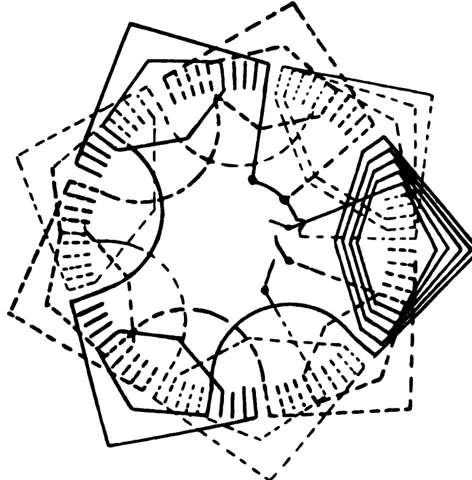


Fig. 199.

d. h. total mit $2 \cdot q \cdot 2p = 4pq$ — liefert eine Dreiphasenwicklung mit $\frac{2}{3}q$ Löchern pro Pol und Phase — d. h. total $3 \cdot \frac{2}{3}q \cdot 2p = 4pq$ — sofern die Polzahl bestehen bleibt. Kann sich diese auch ändern, so gilt allgemein

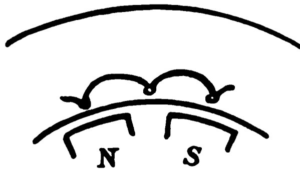


Fig. 200.

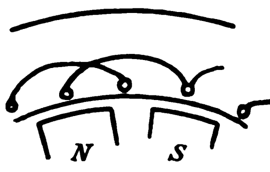


Fig. 201.

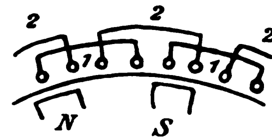


Fig. 202.

bei gegebener Lochzahl $4p_2 q_2 = 6p_3 q_3$. (Index 2 für zweiphasig, Index 3 für dreiphasig). Die Lochzahl muss demnach durch 12 teilbar sein. Die zwei Äste der Zweiphasenwicklung nach links und rechts können auch un-

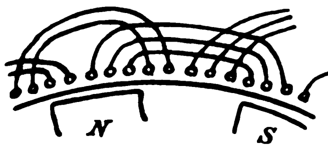


Fig. 203.

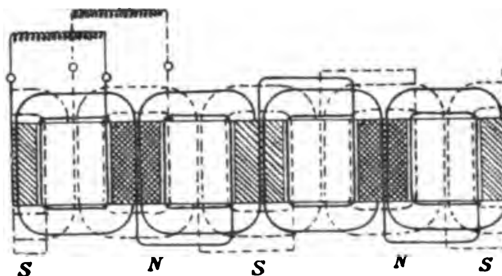


Fig. 204.

gleich sein (Fig. 203: eine Fünflochwicklung). Ein vierpoliges Zweiphasenschema mit acht Spulen zu fünfzehn Drähten ist in der Skizze Fig. 204 gezeichnet.

§ 55. Wicklungen von Dobrowolsky, Lamme, Oerlikon.

Eine schleichende Spulenwicklung, die von v. DOLIVO-DOBROWOLSKY herrührt, zeigt Fig. 205. Die Spulen der einzelnen Phasen sind durch verschiedene Striche unterschieden. Ist a der Lochabstand, so gilt

$$2p\tau = (2p \pm 1)\, a$$

mit der Bedingung, dass $2p \pm 1$ ein ganzes Vielfaches von drei sein muss. Das Anwendungsgebiet dieser Wicklung ist sehr beschränkt. Die Spulenzahl pro Phase muss stets ungerade sein; es sind bei drei Spulen pro Phase z. B. nur acht und zehn Pole, bei elf Spulen nur 32 und 34 Pole möglich. Die Wicklung schleicht um $\tau/_3$ vorwärts oder rückwärts. Diese Spulengruppierung zeigt den gleichen Übelstand wie die Parallelschaltung der induzierten Spulen: Bei verschiedener Stärke der einzelnen Magnetfelder entstehen in den einzelnen Phasen verschiedene Spannungen.

LAMME liess sich durch U.S.P. 546 703 die Dreiphasenwicklung Fig. 206 patentieren. Sie besitzt acht Aussenpole und neun entsprechend verbundene

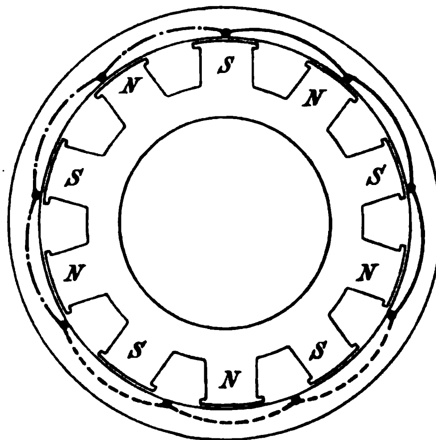


Fig. 205.

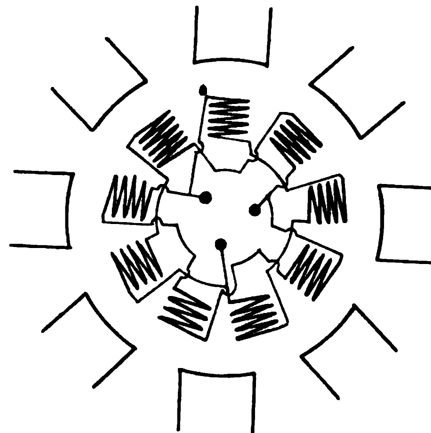


Fig. 206.

Spulen. — Die beiden letzten Wicklungen ebenso wie diejenige der Maschinenfabrik Oerlikon D.R.P. 97 431 gestatten die Verwendung von Spulen, die etwa gleich der Polteilung sind, ohne das Kreuzungen notwendig werden. Das Patent von Oerlikon wählt die Spulenzahl gleich 2/3 bezw. 3/4 mal der Polzahl, je nachdem es sich um Zwei- oder Dreiphasenmaschinen handelt. Der Zwischenraum zwischen zwei Spulen ist gleich 1/2 bezw. 1/3 der Polbreite.

Ein neueres Patent von LAMME (U.S.P. 633 858) zeigt die Wicklungsschemen Fig. 207—209: Es ist eine geschlossene und vollständig symmetrische Schaltung, was die Herstellungskosten reduziert. Die Verbindungsgabeln sind alle gleich lang, während drei verschiedene Stablängen notwendig werden.

Eine Dreiphasenmaschine mit einer Kombination der Dreieck- und Sternschaltung ist in Fig. 210 skizziert. Sie hat zehn Pole und zwölf Spulen, sodass eine Spule nahezu eine Teilung einnimmt, ohne dass Überkreuzungen vorhanden sind. Die Schaltung der Spulen ist durch die Zahlen und das kleine Schema erläutert. Eine ganz entsprechende Zweiphasenwicklung ist aus Fig. 211 ersichtlich.

Bezüglich der monocyklischen Anordnung (Fig. 156) sei noch bemerkt, dass die Windungszahl der Hauptspule sich zu der der Nebenspule häufig wie 1 zu 0,86 verhält, da man dann an den drei Endpunkten nach SCOTT richtigen Dreiphasenstrom bekommt. Das Dreieck der resultierenden Spannungen § 56. Monocyklisches System.

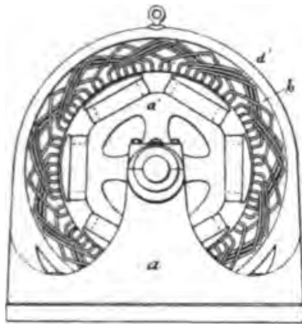


Fig. 207.

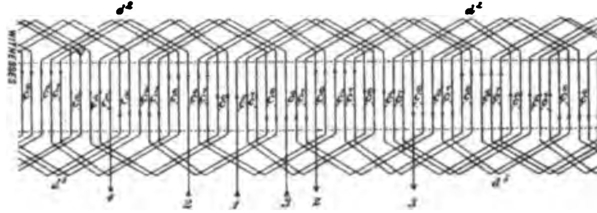


Fig. 208.

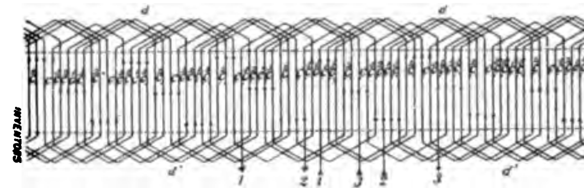


Fig. 209.

(Fig. 157) wird nämlich dann gleichseitig. Die zwei kombinierten Spannungen ergeben sich der Grösse nach zu

$$\sqrt{\frac{e^2}{4}+\left(\sqrt{\frac{3}{2}}\,e\right)^2} = e$$

und der Winkel gegenüber der Hauptphase findet sich aus

$$tg\,\varphi = \frac{\sqrt{3}\,e/_2}{e/_2} = \sqrt{3}$$

zu 120°.

Auf diese Weise ist es also möglich Zweiphasenwicklungen zur Erzeugung von Dreiphasenströmen zu benutzen, was bei Fernübertragung mit Hoch-

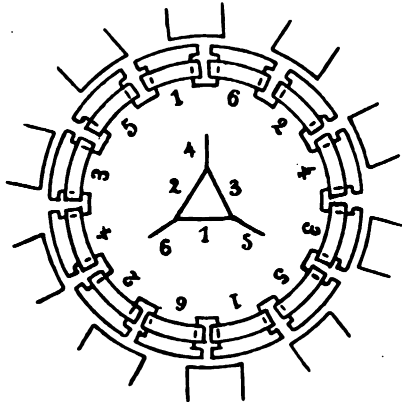


Fig. 210.

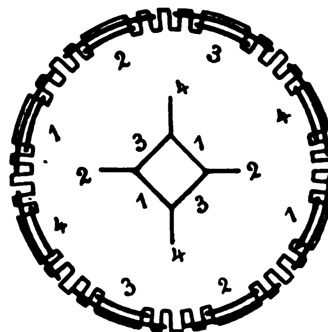


Fig. 211.

spannung von Vorteil ist, da Zweiphasenmaschinen bequemer und betriebsicherer, besonders bei der doppelankrigen Induktortype ohne Kreuzungspunkte zu wickeln sind, während Dreiphasenströme sich mit geringerer

Kupfermenge übertragen lassen als zweiphasige; auch der induktive Abfall in der Leitung ist geringer. Bei einer derartigen Verwendung des monocyklischen Systems kann auch gemäss Fig. 212 der Verkettungspunkt nach aussen geführt werden.

Verschiedene weitere Wicklungsanordnungen, namentlich von Spulenankern, die allerdings meist veraltet sind, finden sich in dem Kapitel „Historisches." Auch aus dem Kapitel „Einteilung der Wechselstrommaschinen" sind Wicklungen zu ersehen und schliesslich ist auf den Abschnitt: „Neuere Typen von Wechselstrommaschinen" zu verweisen.

§ 57. Hilfswicklungen. Besondere Wicklungen.

Hochspannungsmaschinen wurden früher häufig zur Spannungsmessung Hilfswicklungen eingefügt, in denen ein geringer Bruchteil der Gesamtspannung induziert wurde (Fig. 213). Man ist jedoch mit Recht von dieser Anordnung verschiedentlich wieder abgekommen, da sie nicht selten zu Durchschlägen

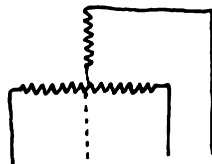


Fig. 212.

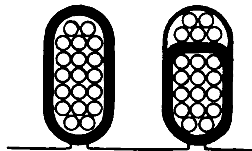


Fig. 213.

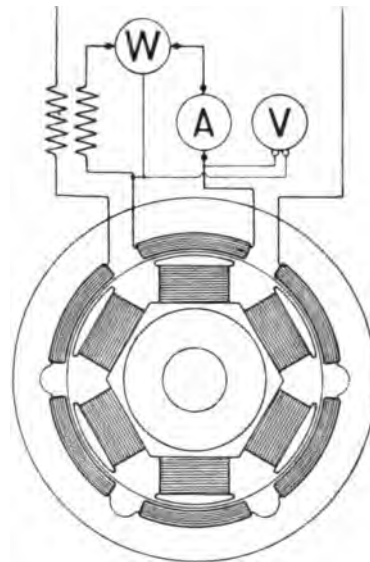


Fig. 214.

und Betriebstörungen Veranlassung gegeben haben, sofern man nicht die Hilfswicklung sehr sorgfältig vom Gestell und der Hauptwicklung isoliert, siehe übrigens E. T. Z. 1899 S. 868, Schüler. Die Hilfswicklung misst überdies an sich nur die *EMK*, nicht die Klemmenspannung. Neuerdings wird gewöhnlich die volle Spannung gemessen oder ein Reduktionstransformator eingeschaltet oder auch die Spannung einer einzelnen Spule (Fig. 214 nach Schüler) bei Maschinen mit sehr vielen Polen oder diejenige einiger Windungen einer Spule ev. unter Zwischenschaltung eines sogenannten Isolationstransformators gemessen. Letzterer hat gewöhnlich das Übersetzungsverhältnis 1 : 1 und ist zwischen den beiden Wicklungen sorgfältig isoliert. Unbedingte Sicherheit bietet keine dieser Anordnungen.

Es giebt Fälle, wo Maschinen mit zwei Wicklungen zu versehen sind: mit einer Hochspannungswicklung für die Fernübertragung und mit einer Niederspannungswicklung für den naheliegenden Bedarf, z. B. für die Beleuchtung des Maschinenhauses. Ein ganz extremer Fall in dieser Richtung liefert die Ausnützung von Wasserfällen, die einmal auf weite Ferne zu über-

tragen sind und andererseits für eine dicht dabeiliegende Carbidfabrik verwendet werden, welche nur 50—80 Volt nötig hat.

Für Dreileiternetze hat die Warren Medberry Co. in Amerika eine beachtungswerte Wicklungsanordnung, um wenigstens bis zu einer gewissen Grenze in den beiden Zweigen bei variabler Belastung konstante Spannung zu halten: Es ist ein Umschalter vorhanden, der es ermöglicht, den Mittelleiter etwas rechts oder links vom Mittelpunkt der Maschinenwicklung anzuschliessen.

15. Elektromotorische Kraft der Wechselstrommaschinen.

Die früher entwickelte Beziehung für die elektromotorische Kraft *Gl.* 5 setzte sinusförmigen Verlauf voraus, was aber in den praktisch verwendeten Wechselstrommaschinen in der Regel nicht der Fall ist. Angenähert ist dies nur der Fall, wenn eine Spule Fig. 215 von sehr geringer Ausdehnung in

§ 58. Ursache der Abweichung von der Sinusform.

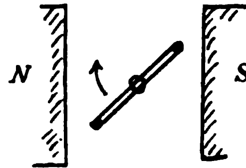


Fig. 215.

einem zweipoligen Felde mit vollständig gleichmässiger Kraftlinienverteilung gleichförmig rotiert. Schon in der Anordnung Fig. 216 ist keine Rede mehr von einer sinusförmigen Spannungskurve. Die Kraftlinienänderung $\frac{dK_t}{dt}$, welcher die Spannung proportional ist, bleibt während einer halben Periode

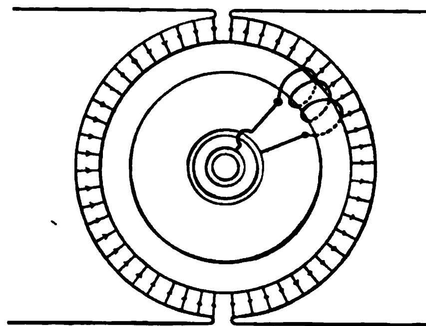


Fig. 216.

konstant; mittlere, effektive und maximale elektromotorische Kraft sind einander gleich und die Beziehung für die effektive elektromotorische Kraft lautet nach der auf S. 44 angegebenen Tabelle

$$E = 2nZK \cdot 10^{-8}.$$

Eine weitere Abweichung von der Sinusform ausser der eben besprochenen, die darauf beruht, dass die Spule keine reine rotierende Bewegung, sondern

auch eine Verschiebung ausführt, bedingt die Thatsache, dass Wechselstrommaschinen meist nicht zweipolig sind, sondern eine grosse Anzahl Pole besitzen; dadurch tritt der Fall ein, dass die rotierende Bewegung sehr in den Hintergrund tritt und die lineare Verschiebung von Pol zu Pol ausschlaggebend wird.

Der verschiedenen Weglänge der einzelnen Kraftlinien halber wird die Feldverteilung im Luftzwischenraum niemals eine gleichförmige sein, namentlich bei Polschuhen wird das Feld sich gegen die Ränder abflachen. Es wurde auch schon darauf aufmerksam gemacht, dass bei Hintereinanderschaltung von Windungen, die nicht in der genau gleichen Lage gegenüber dem

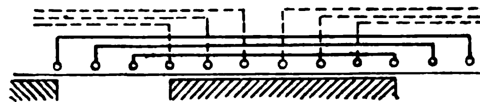


Fig. 217.

Magnetfeld liegen, die elektromotorischen Kräfte sich nicht algebraisch addieren, sondern geometrisch. Die Kurven der Einzelspannungen in den Windungen werden sich also überlappen. Schliesslich beeinflusst auch die Polbreite in ihrem Verhältnis zur Teilung die erzeugte elektromotorische Kraft. G. Kapp hat für viele praktisch verwendete Wicklungen die Beziehung zwischen der effektiven elektromotorischen Kraft und der Kraftlinienzahl:

$$E = c n Z K \cdot 10^{-8}$$

ermittelt und Tabellen für den Koeffizienten c aufgestellt. Er hat dabei angenommen, dass die Felddichte unter den Polen konstant ist und zwischen

§ 59. Kapp'sche Koeffizienten.

den Polen kein Feld auftritt. Diese Koeffizienten ergeben wohl ziemlich gut mit den Thatsachen übereinstimmende Resultate, sie berücksichtigen jedoch

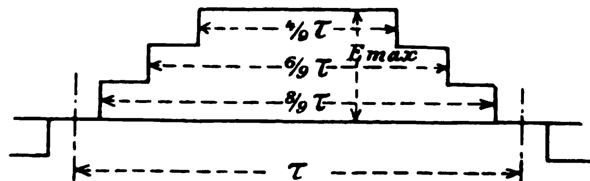


Fig. 218.

feinere Details der Wicklung und der Kraftlinienverteilung nicht, sodass der Koeffizient c gewöhnlich zu gross ist, häufig um 5—10 Proc.

Es möge hier nur die Entwicklung des Koeffizienten c für einen speziellen Fall ausgeführt[1]) werden und zwar für eine dreiphasige Dreilochwicklung, wobei die Polbreite $P = 2/3$ der Teilung sei (Fig. 217). Für die elektromotorische Kraft einer Phase ergiebt sich der treppenförmige Verlauf Fig. 218, der allerdings in Wirklichkeit ziemlich abgerundet wird. Die Kurve ergiebt sich folgendermassen:

Die Spule liege zunächst ganz symmetrisch zu einem Pol; dann sind alle sechs Stäbe feldfrei und bleiben es bei einer Bewegung um $^1/_{18}\,\tau$. Dann

1) Nach G. Kapp, Die Dynamomaschinen.

treten zwei Stäbe unter je einen Pol; es wird eine elektromotorische Kraft $\frac{1}{3}E_{max}$ auf einer Länge $\frac{1}{9}\tau$, dann von $\frac{2}{3}E_{max}$ auf gleicher Länge und schliesslich von E_{max} auf einer Länge $\frac{4}{9}\tau$ induziert. Für die effektive Spannung E ergiebt sich damit die Beziehung

$$\tau E^2 = E_{max}^2 \left\{\frac{4}{9}\tau + \left(\frac{2}{3}\right)^2 \cdot \frac{2}{9}\tau + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \frac{2}{9}\tau\right\}$$

$$E = 0{,}752\, E_{max}.$$

Für E_{max} gilt die Beziehung

$$E_{max} = Z\frac{dK_t}{dt}10^{-8} = Z\frac{K}{t_p}10^{-8} = Z\frac{K}{{}^1/_3\, n}10^{-8} = 3\, n\, Z K \cdot 10^{-8}$$

(t_p ist die Zeit, die zum Durchlaufen der Polbreite $P = \frac{2}{3}\tau$ nötig ist) und damit ergiebt sich schliesslich:

$$E = 2{,}26\, n\, Z K \cdot 10^{-8}.$$

Nachstehend sind die unter den erwähnten Annahmen bestimmten Koeffizienten von Kapp zusammengestellt. Die erste Tabelle entspricht z. B. der Wicklung Fig. 169, die zweite der Fig. 171, die dritte den Figg. 174 u. 176. und Tabelle 4 z. B. der Fig. 173. Es sind die Werte für die Gleichpol- und für die Wechselpoltype angegeben, wobei unter der Teilung τ bei der Gleichpoltype die halbe Entfernung von Polzacke zu Polzacke zu verstehen ist, da dieser Abstand einer vollen Periode des Magnetfeldes und nicht wie bei der Wechselpoltype nur einer halben Periode entspricht. Die vorletzte Reihe der Tabelle 3 gilt für eine geschlossene Gleichstromwicklung Fig. 162, und die letzte Spalte für eine schleichende Stabwicklung Fig. 193. Da bei Gleichpolen und kurzen Spulen die Spannungskurve unsymmetrisch wird, falls man P kleiner als τ macht, ist in Tabelle 4 ein kleinerer Wert als $P/\tau = 1$ nicht aufgenommen:

Tabelle 1.

(Glatte Wicklungen, lange Spulen.)

$\frac{s}{\tau}$		0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	1	(s Spulenbreite)
$\frac{P}{\tau} =$	1	2,00	1,76	1,64	1,49	1,16	Gleichpole
	$\frac{4}{5}$	2,23	1,96	1,82	1,66	1,29	
	$\frac{2}{3}$	2,46	2,23	2,13	1,94	1,49	Wechselpole
	$\frac{1}{2}$	2,83	2,50	2,32	2,12	1,64	

Tabelle 2.

(Zackenwicklung.)

Breite der Ankerzacken: Teilung		$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	
Breite der Polzacken: Teilung	$\frac{2}{3}$	2,10	1,73	Wechselpole
	$\frac{1}{2}$	2,30	2,00	

Tabelle 3.

(Nutenanker und lange Spulen.)

	Unendlich viele Löcher pro Pol und Phase			3 Löcher pro Pol und Phase		2 Löcher pro Pol und Phase		1 Loch pro Pol und Phase	Geschl. Wicklung	Schleich. Wicklung	
Anzahl Phasen	1	2	3	1 u. 2	1 u. 3	1 u. 2	1 u. 3	1, 2 u. 3	1	3	
$\frac{s}{\tau}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{9}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	0	1	$\frac{2}{3}$	
$\frac{P}{\tau} =$ 1	1,16	1,64	1,76	1,68	1,80	1,72	1,82	2,00	1,16	1,49	Gleich-
$\frac{P}{\tau} =$ $^4/_5$	1,29	1,82	1,96	1,98	2,10	2,02	2,12	2,23	1,29	1,66	pole
$\frac{P}{\tau} =$ $^2/_3$	1,49	2,13	2,23	2,16	2,26	2,18	2,30	2,46	1,49	1,94	Wechsel-
$\frac{P}{\tau} =$ $^1/_2$	1,64	2,32	2,5	2,36	2,54	2,45	2,59	2,83	1,64	2,12	pole

Tabelle 4.

(Nutenanker und kurze Spulen für Dreiphasenwicklungen.)

	Gleichpole	Wechselpole	
$\frac{P}{\tau} =$	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
$c =$	1,64	2,12	2,32

§ 60. Kritik verschiedener Anordnungen in Bezug auf den Spannungskoeffizienten.

Die Tabellen zeigen durchweg, dass der Koeffizient c mit abnehmender Polbreite P steigt; dies bedeutet allerdings nicht direkt eine Steigerung der elektromotorischen Kraft, da mit der Polbreite in gewisser Hinsicht auch die Kraftlinienzahl pro Pol abnimmt. Da andererseits die Polbreite der Streuung von Pol zu Pol halber nicht zu weit getrieben werden kann, so stösst man nach oben und unten auf eine gewisse Grenze in der Polbreite. Bei Wechselpolen schwankt $P:\tau$ zwischen 0,5 und 0,8, bei der Gleichpoltype sollte der lichte Raum zwischen zwei Polzacken gleich oder grösser als die Polbreite sein; $P:\tau$ schwankt hier zwischen 1 und 0,7. Breite Pole haben den Vorteil, am ehesten sinusförmige Spannungskurven zu liefern, da sich das Feld an den Rändern abflacht. Auch eine grosse Unterteilung der Wicklung, d. h. die Verwendung vieler Nuten pro Pol und Phase wirkt in gleichem Sinne günstig. Dass es andererseits ratsam ist, mit der Polbreite nicht zu hoch zu gehen, beweisen die Messungen von Hutin & Leblanc, wobei noch vorausgeschickt sein möge, das öfters gefunden wurde, dass ein Abhauen von Polschuhen oder von Polkanten die elektromotorische Kraft durchaus nicht verminderte. Hutin & Leblanc fanden, dass bei aussergewöhnlich breiten Polschuhen die Erregung wesentlich grösser ausfiel, als bei solchen von gewöhnlicher Breite; es ergab sich bei breiten Polschuhen eine Verschlechterung des Wirkungsgrades von 94,3 auf 92,5 Proc.

Die angeführten Tabellen ermöglichen es ohne weiteres, die Leistung bezw. Ausnützung einer Maschine bei Wechselstromentnahme mit derjenigen bei Gleichstromentnahme zu vergleichen. Die elektromotorische Kraft einer Gleichstrommaschine ist bekanntlich:

$$E_g = n Z K \cdot 10^{-8}.$$

Die elektromotorischen Kräfte bei Wechselstrom und Gleichstrom verhalten sich also wie c zu 1. Die elektromotorische Kraft für Wechselstrommaschinen ist also im allgemeinen zweimal grösser als diejenige der Gleichstrommaschinen. Da jedoch bei gleicher Leiterzahl die Stromstärke des Gleichstromankers für gleiche Stromdichte doppelt so gross ist wie bei Wechselstrom wegen der zwei durch die Bürsten parallel geschalteten Ankerhälften, so kommt die Leistung beider Maschinentypen ziemlich auf das Gleiche heraus. Aus der Tabelle für die Koeffizienten c geht hervor, dass die üblichen Drehstromwicklungen (Fig. 176) einer für Drehstrom verwendeten geschlossenen Gleichstromwicklung ganz erheblich überlegen sind.

Görges hat in E. T. Z. 1892 die verschiedenen Wicklungsarten auf einem Ring bezüglich ihrer Ausgiebigkeit miteinander verglichen. Unter der Voraussetzung eines sinusförmigen Kraftlinienfeldes ergiebt sich für die elektromotorische Kraft einer Spule, die zwischen den Winkeln φ_1 und φ_2 liegt, der Ausdruck (z totale Windungszahl, φ variabler Winkel) § 61. Ausgiebigkeit der Wicklungen.

$$e = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{zK}{T} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \varphi\right) \cdot d\, 2\pi\varphi$$

und für den Effektivwert in Volt

$$E = \sqrt{2} \sin \left(2\pi \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cdot \frac{zK}{T} \cdot 10^{-8} = k \cdot zKn \cdot 10^{-8}.$$

Für die Leistung bezw. für die Ausgiebigkeit der Wicklung ist der Ausdruck $\frac{E}{\varphi_1 - \varphi_2}$ massgebend, für den sich in Prozenten die anschliessende Tabelle ergiebt:

Phasen	$\frac{E}{\varphi_1 - \varphi_2}$
2[1]	63,6 %
3	82,6 „
4[2]	90,0 „
6[3]	95,3 „
12	98,8 „
∞	100,0 „
Gleichstrom	90,0 „

Parshal & Hobart haben im Engineering 1898 für den Wert des Formfaktors $c/_2$ interessante Kurven gegeben, welche in Fig. 219 u. 220 niedergelegt sind. Die Ordinaten geben immer die Polbreite in Prozenten der Teilung an; die erste Figur behandelt den Einfluss der Spulenbreite; die an die Kurven geschriebenen Prozentzahlen bedeuten den Anteil des bewickelten Raumes zum überhaupt verfügbaren. In der zweiten Figur ist die Unterteilung der Spulen einem Vergleich unterzogen; die oberste Kurve entspricht einer Ankerspule pro Pol, die unterste deren vier, und dann ist noch eine für unendlich grosse Unterteilung eingezeichnet. Die Kurven gelten für Einphasenwicklungen. § 62. Graphische Darstellung der Spannungskoeffizienten.

1) Gewöhnlich einphasig genannt.
2) Gewöhnlich zweiphasig genannt.
3) Gewöhnlich dreiphasig genannt.

Die unterteilten Wicklungen nützen den Raum besser aus; die Kühlung ist auch vorteilhafter. Wenn auch der Koeffizent c mit der Unterteilung abnimmt, so wird andererseits bei Behandlung des Spannungsabfalls erläutert werden, dass eine unterteilte Wicklung geringere Selbstinduktion hat als eine Einlochwicklung.

§ 63. Wechselspannungen an Gleichstromankern.

Der erörterte Einfluss der Pol- und Spulenbreite hat auch zur Folge, dass die früher angegebenen Werte für die Wechselspannungen, die einem

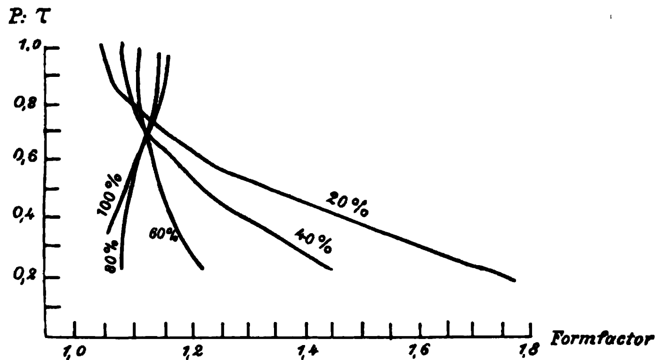


Fig. 219.

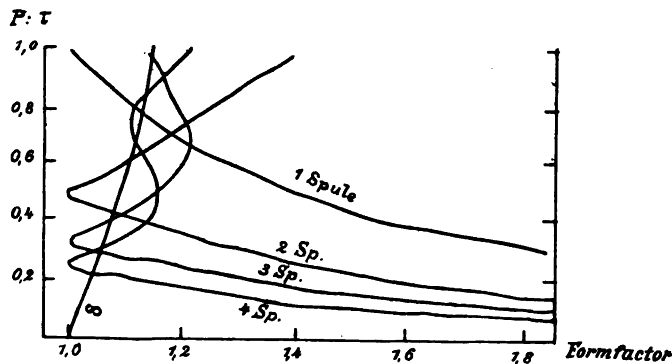


Fig. 220.

Gleichstromanker entnommen werden können, nur für sinusförmige Spannungskurven gelten. Es ist schon früher angegeben, dass der Effektivwert irgend einer Mehrphasenspannung bei geschlossener Wicklung ist:

$$E_{p'} = \frac{c}{p'} E_g.$$

Kapp hat diese Beziehung für verschiedene Polbreiten ausgewertet und nachstehende Tabelle für die Spannungen zwischen zwei benachbarten Schleifringen ermittelt:

$P:\tau$	$^2/_3$	$^1/_2$
Gleichstrom	1	1
Einphasig	0,75	0,82
Zweiphasig	0,75	0,82
Dreiphasig	0,65	0,71
Vierphasig	0,53	0,58
Sechsphasig	0,37	0,42

16. Thatsächliche Form des Drehfeldes.

Die Entwicklung für das Drehfeld, das mit konstanter Stärke und konstanter Winkelgeschwindigkeit rotiert, gilt ebenfalls nur für sinusförmige Einzelfelder und eine Spulenanordnung, die pro Phase ungefähr der Fig. 221 § 64. Resultierendes Drehfeld.

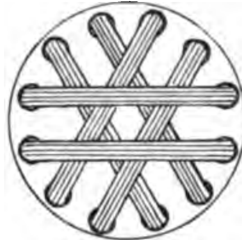


Fig. 221.

entspricht. Bei grosser Polzahl, wobei man sich die einzelnen Wechselfelder nicht mehr über einen in drei Teile geteilten Kreisumfang aufgetragen zu denken hat, sondern eine Ausbreitung nach Fig. 174 der Wahrheit am nächsten

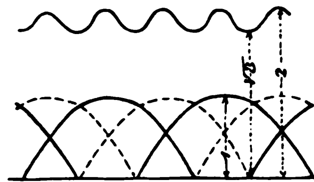


Fig. 222.

kommt, ergiebt sich als Resultierende der drei um 120^0 verschobenen Wechselfelder (Fig. 222) ein etwas pulsierendes Drehfeld mit dem Maximalwert $2K$ und mit dem Minimalwert $\sqrt{3}\,K$, im Mittel $\sim 1{,}86\,K$. Die räumliche Verteilung des Drehfeldes über den Umfang ist unter Annahme einer einzigen Nute pro

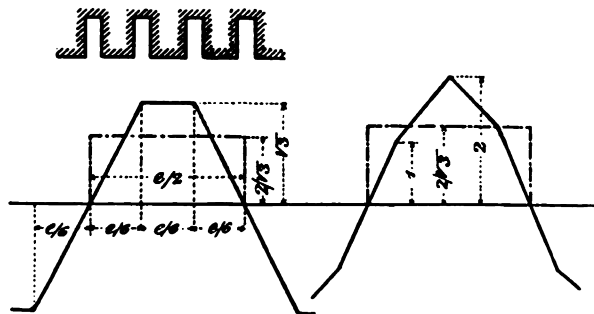


Fig. 223.

Pol und Phase in Fig. 223 aufgezeichnet. Die erste Kurve gilt für den Augenblick, in dem eines der drei Wechselfelder $= 0$ und die zwei anderen $= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot K$ sind, und die zweite Kurve gilt für den Fall, dass zwei Einzelfelder $= \frac{K}{2}$ und das dritte $= K$ ist. Maximum zu Minimum verhält sich

ebenfalls wie 2 zu $\sqrt{3}$. Für drei Nuten pro Pol und Phase gelten in entsprechender Weise die Kurven Fig. 224. Die beiden Kurven geben je nur die Extreme, dieselben gehen allmählich ineinander über.

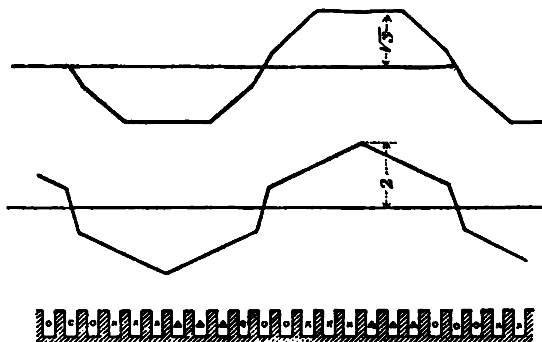


Fig. 224.

§ 65. Spannungskoeffizienten für Drehfelder.

HEUBACH hat in E. T. Z. 1899 die Bestimmung des resultierenden Drehfeldes behandelt. Er giebt für die zwei extremen Fälle einer Dreiphasenwicklung mit drei Nuten pro Pol und Phase die zwei staffelförmigen Kurven

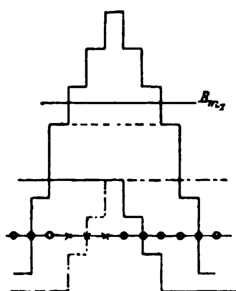


Fig. 225.

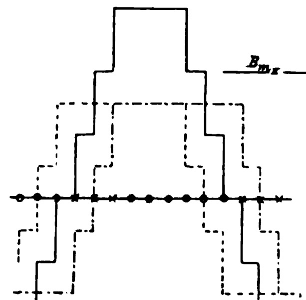


Fig. 226.

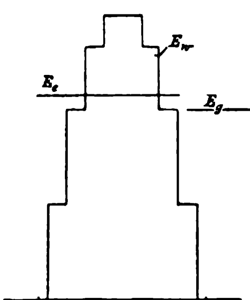


Fig. 227.

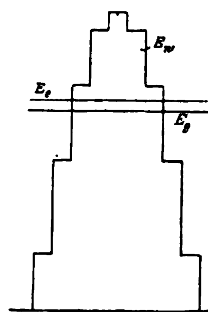


Fig. 228.

Fig. 225 u. 226 für das Drehfeld. Die Einzelfelder sind ebenfalls eingezeichnet. Die Fig. 224 gilt, wie erwähnt, für dieselbe Wicklung, nur sind in dem dort gezeichneten Kurvenverlauf die Staffeln durch Ausgleichslinien ersetzt. Die zu der Feldverteilung Fig. 225 u. 226 gehörigen elektromoto-

rischen Kräfte sind in Fig. 227 u. 228 gezeichnet. HEUBACH findet, dass der Koeffizient c in der Beziehung

$$E = c n Z K_d \cdot 10^{-8}$$

bei verschiedener Nutenzahl pro Pol und Phase nach der folgenden Tabelle variiert. In der Formel ist K_d die gesamte Kraftlinienzahl des Drehfeldes, E die effektive elektromotorische Kraft und Z die Leiterzahl je pro Phase. In der Tabelle ist auch noch das Verhältnis λ des Mittelwertes zum Maximalwerte des Drehfeldes in seiner räumlichen Verteilung angegeben. Der Moment I entspricht immer dem resultierenden Drehfeld mit dem grössten Maximum (bei Dreiphasenstrom: eines der Wechselfelder $= K$, zwei $= \frac{K}{2}$; bei Zweiphasenstrom: beide Wechselfelder $= \sqrt{\frac{1}{2}} K$), der Moment II demjenigen mit dem geringsten Maximum (bei Dreiphasenstrom: ein Wechselfeld o, zwei $= \frac{1}{2}\sqrt{3}\, K$, bei Zweiphasenstrom: ein Wechselfeld K, das andere o).

Anzahl der Nuten pro Spulenseite	Moment I		Moment II	
	$c/_2$	λ	$c/_2$	λ
	Zweiphasenwicklungen			
1	1,414	0,500	1,000	0,707
2	1,120	0,500	1,055	0,530
3	1,070	0,500	0,974	0,550
4	1,055	0,500	0,995	0,530
5	1,042	0,500	0,974	0,536
∞	0,990	0,500	0,934	0,530
	Dreiphasenwicklungen:			
1	1,060	0,667	1,232	0,575
2	1,090	0,582	1,105	0,575
3	1,052	0,592	1,082	0,575
4	1,068	0,583	1,082	0,575
5	1,052	0,588	1,073	0,575
∞	1,025	0,585	1,042	0,575

Für Dreiphasenströme kann man also bei unterteilter Wicklung im Mittel stets mit $c = 2{,}1$ und mit $\frac{1}{\lambda} = 1{,}7$ rechnen.

§ 66. Ermittlung von Spannungskoeffizienten für Drehfelder.

Es ist wohl von Interesse, zu erwähnen, dass man durch entsprechende Integration unter Annahme einer sinusförmigen räumlichen Drehfeldverteilung für die Drehfeldwicklung Fig. 151 die Beziehung bekommt

$$E = 2{,}13\, n Z K_d \cdot 10^{-8}$$

aus dem Integral

$$e = \int_{a=\frac{\pi}{6}}^{a=-\frac{\pi}{6}} 2\pi n K_d \cos(a - \omega t) \frac{3}{\pi} \frac{Z}{2} da \cdot 10^{-8}$$

$$= 6 K_d n \frac{Z}{2} \cos \omega t = 3 K_d n Z \cos \omega t.$$

Bei Zweiphasenschaltung nach Fig. 146 findet sich

$$e = \int_{-\frac{\pi}{4}}^{+\frac{\pi}{4}} n\, K_d \frac{Z}{2}\, 10^{-8} \cos(\omega t + a)\, d a$$

$$= 4 \sqrt{2}\, n\, K_d \frac{Z}{2} \cos \omega t,$$

also

$$E = 2\, n\, Z K_d \cdot 10^{-8}.$$

§ 67. Kraftlinien- und Spannungskurve. Bei stark unterteilter Wicklung hat die Art der Feldverteilung auf den Wert der elektromotorischen Kraft einen geringen Einfluss, vorausgesetzt, dass immer die gleiche Kraftlinienzahl geschnitten wird. In Fig. 229 u. 229a ist je

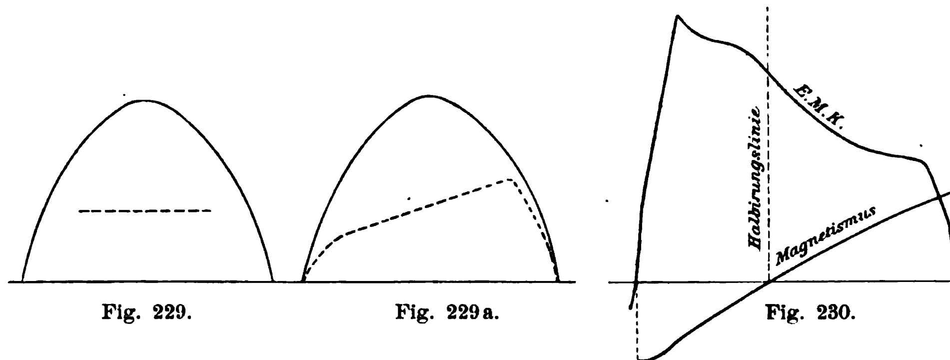


Fig. 229. Fig. 229a. Fig. 230.

die Spannungskurve gezeichnet, die zu den zwei ganz verschiedenen Kurven der Feldverteilung (— —) gehört. In Fig. 230 ist noch ein weiteres Kurvenpaar: elektromotorische Kraft und zugehörige Feldverteilung, gezeichnet.

C. Die belastete Wechselstrommaschine.

---

17. Stromstärke einer Wechselstrommaschine.

Die von einer Wechselstrommaschine gelieferte Stromstärke i, welche ebenso wie die elektromotorische Kraft e periodischer Natur ist, lässt sich, falls w der gesamte Widerstand des Stromkreises, L der Selbstinduktionskoeffizient und C die Kapazität des Stromkreises ist, finden aus der Beziehung: § 68. Grundgleichung eines Wechselstromkreises.

$$e = L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i\,dt + iw,$$

worin $e = f(t)$ die periodische elektromotorische Kraft bedeutet.

Die Gleichung lässt sich auf die Form bringen:

$$\frac{d i^2}{d t^2} + \frac{W}{L}\,\frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = \frac{1}{L}\,\frac{de}{dt} = \frac{1}{L}\,f'(t). \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

Als allgemeine Lösung ergiebt sich der Ausdruck:

$$i = \frac{C}{\sqrt{w^2C^2 - 4LC}}\left\{\varepsilon^{-\frac{t}{\tau_1}}\int_0^t \varepsilon^{\frac{t}{\tau_1}} f'(t)\,dt - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau_2}}\int_0^t \varepsilon^{\frac{t}{\tau_2}} f'(t)\,dt\right\}$$

$$+ c_1\,\varepsilon^{-\frac{t}{\tau_1}} + c_2\,\varepsilon^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

worin die Abkürzung τ_1 und τ_2 zu ersetzen ist durch

$$\left.\begin{matrix}\tau_1\\ \tau_2\end{matrix}\right\} = \frac{2LC}{wC \mp \sqrt{w^2C^2 - 4LC}}. \quad \varepsilon \text{ ist } = 2{,}7183.$$

Bei Sinusform der elektromotorischen Kraft

$$e = f(t) = E_{max}\sin 2\pi n t = E_{max}\sin \omega t$$

ergiebt sich für den Strom die Beziehung

$$i = \frac{E_{max}}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2}}\,\sin\left\{\omega t + \text{arc tg}\left(\frac{1}{Cw\cdot\omega} - \frac{L\omega}{w}\right)\right\}$$

$$+ c_1\,\varepsilon^{-\frac{t}{\tau_1}} + c_2\,\varepsilon^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

Der Phasenwinkel φ zwischen elektromotorischer Kraft e und Stromstärke i ist dann gegeben durch den Ausdruck

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{C w \omega} - \frac{L \omega}{w} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (18)$$

Der Strom eilt der Spannung nach bezw. voraus, je nach dem

$$L \omega \gtrless \frac{1}{C \omega}.$$

Es lässt sich in einfacher Weise zeigen, dass die Exponentialglieder nur für die ersten Augenblicke, nachdem der Stromkreis geschlossen ist, von

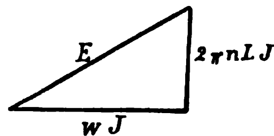


Fig. 231.

nennenswerter Grösse sind, nachher sind sie vollständig zu vernachlässigen, sodass sich für den Effektivwert J des Stromes schreiben lässt:

$$J = \frac{E}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2}} \quad \ldots \ldots \quad (19)$$

oder

$$J^2 w^2 + J^2 \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2 = E^2,$$

was sich nach Fig. 231 durch ein rechtwinkliges Dreieck mit den Katheten Jw und $2\pi n L J$ und der Hypotenuse E darstellen lässt, wenn $C = o$.

§ 69. Kriterium für Sinusform.

Die Beziehung

$$J^2 = \frac{E^2}{w^2 + 4\pi^2 L^2 n^2}$$

wurde wohl schon in der Form

$$\frac{1}{J^2} = \frac{w^2 + 4\pi^2 L n^2}{E^2}$$

als Kriterium für Sinusform der Strom- und Spannungskurve benutzt, indem sie graphisch dargestellt wird: $\frac{1}{J^2}$ als Ordinaten und w^2 als Abscissen, L und E bleiben konstant. Die entstehende Kurve muss eine Gerade sein. Dieses Kriterium ist jedoch gar nicht scharf bestimmbar und unzuverlässig.[1])

18. Leistung einer Wechselstrommaschine.

§ 70. Leistung bei Sinusform.

Die Leistung A eines Wechselstroms bestimmt sich aus dem Produkt der Momentanwerte der elektromotorischen Kraft e und der Stromstärke i

1) H. F. Weber, Wied. Ann. 63, S. 374.

und zwar summiert über den Zeitraum von einer Sekunde, d. h. die sekundliche Arbeit ist

$$\int_0^1 e\,i\,dt.$$

Die Arbeit während einer halben Periode lässt sich bei Sinusform von Strom und Spannung darstellen durch den Ausdruck:

$$A_T = \int_0^{\frac{T}{2}} e\,i\,dt = \int_0^{\frac{T}{2}} E_{max} \sin \omega t \cdot J_{max} \sin (\omega t - \varphi)\, dt$$

und anschliessend findet sich in der Voraussetzung von sinusförmigem Verlauf von Stromstärke und Spannung für die sekundliche Arbeit:

$$A = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E_{max} \sin \omega t\, J_{max} \sin (\omega t - \varphi)\, dt.$$

Durch Integration ermittelt man:

$$A = \frac{E_{max}\, J_{max}}{2} \cos \varphi = E\, J \cos \varphi. \quad .\ .\ .\ .\ (20)$$

Cos φ kann auch nach den Beziehungen für die Stromstärke durch eine Grösse, die L, C, w und ω enthält, ersetzt werden:

$$A = E J \frac{w}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2}}.$$

Die äussere Arbeit, welche die Wechselstrommaschine leistet, ist kleiner als der angeschriebene Ausdruck; es sind die Verluste in der Maschine abzuziehen; die Nutzleistung der Wechselstrommaschine ist das Produkt aus der effektiven Klemmenspannung E_k, dem effektiven Strom J und dem Leistungsfaktor cos φ des Netzes.

19. Klemmenspannung.

Die Klemmenspannung E_k bestimmt sich als vektorielle Differenz der elektromotorischen Kraft E und des Spannungsabfalles in der Maschine, der sich aus zwei Komponenten zusammensetzt: Aus dem Ohmschen Abfall § 71. Graphische und analytische Bestimmung der Klemmenspannung.

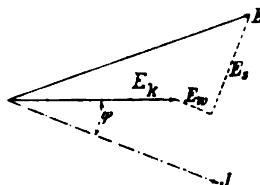


Fig. 232.

$J w_i = E_w$ durch den Kupferwiderstand und eventuell für die Eisenverluste und aus dem induktiven $2\pi n L_i J = E_s$. Ersterer ist phasengleich mit dem Strom, letzterer eilt ihm um 90° nach. Die Ermittlung der Klemmenspannung geschieht zweckmässig graphisch nach Fig. 232; man setzt $J w_i$ und $2\pi n L_i J$

zu dem Gesamtabfall E_a zusammen und zieht diesen wieder von E ab. Aus der Figur lässt sich für die Klemmenspannung E_k die Beziehung ablesen:

$$E^2 = E_k^2 + E_a^2 + 2\,E_k\,E_a \cos\left\{\text{arc tg}\left(\frac{2\pi n L_i}{w_i}\right) - \varphi\right\}. \quad . \quad (21)$$

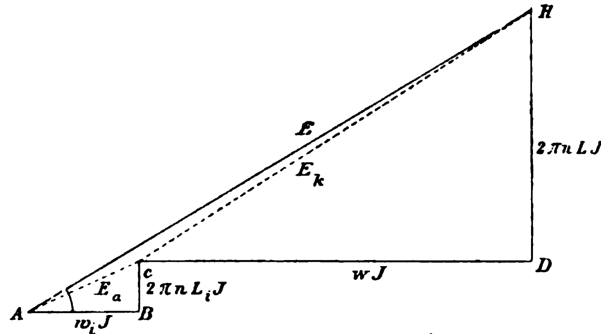


Fig. 233.

Das Diagramm für einen vollständigen Stromkreis ist in Fig. 233 niedergelegt, die ohne weiteres verständlich ist; w_a und L_a gelten für den äusseren Stromkreis. Der Winkel HcD ist der Phasenwinkel des Netzes.

20. Stromstärke bei Abweichung von der Sinusform. Resonanz.

§ 72. Effektivwert bei nichtsinusförmigen Verlauf.

Verläuft die elektromotorische Kraft nicht sinusförmig, so lässt sie sich jedenfalls nach der FOURIER'schen Reihe in harmonische Glieder auflösen von der Periodenzahl[1]) n, $3n$, $5n$ etc.:

$$e_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + e_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + e_5 \sin(5\omega t + \varphi_5) \ldots$$

Für jede dieser Schwingungen lässt sich die oben in Gleichung 19 niedergelegte Beziehung für die Stromstärke anschreiben; der Gesamtstrom ist die Summe der Einzelströme[2]):

$$\frac{(E_1)_{max}}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2}} \sin(\omega t + \psi_1) + \frac{(E_3)_{max}}{\sqrt{w^2 \left(\frac{1}{3\,C\omega} - 3\,L\omega\right)^2}}$$

$$\sin(3\omega t + \psi_3) + \ldots \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (22)$$

Der Effektivwert J ist bestimmt aus den einzelnen Strommaxima:

$$J = \frac{1}{\sqrt{2}} \{(J_1)^2_{max} + (J_3)^2_{max} + (J_5)^2_{max} + \ldots\}^{1/2}. \quad . \; . \; . \quad (23)$$

1) Die geraden Periodenzahlen sind in der Praxis fast immer vernachlässigbar.
2) Ein elementares, graphisches Integrationsverfahren für diese Aufgabe

$$\frac{L\,di}{dt} + \frac{1}{C}\int i\,dt + i\,w = e$$

giebt R. GOLDSCHMIDT, E. T. Z. 1899, S. 840.

In gleicher Weise ist

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \{(E_1)^2_{max} + (E_3)^2_{max} + (E_5)^2_{max} + \ldots\}^{1/2}. \quad . \quad . \quad (24)$$

§ 73. Veränderung der Stromkurve durch Selbstinduktion und Kapazität.

Enthält die Belastung einer Wechselstrommaschine beträchtliche Selbstinduktion, so werden die höheren harmonischen Glieder der Spannungskurve in der Stromkurve:

$$\frac{(E_1)_{max}}{\sqrt{w^2 + L^2\omega^2}} \sin(\omega t - \psi_1) + \frac{(E_3)_{max}}{\sqrt{w^2 + 9L^2\omega^2}} \sin(3\omega t - \psi_3)$$
$$+ \frac{(E_5)_{max}}{\sqrt{w^2 + 25L^2\omega^2}} \sin(5\omega t - \psi_5) \ldots$$

abgeflacht, da die Amplituden der Partialströme mit zunehmender Schwingungszahl gegenüber der Spannungskurve abnehmen. Eine Kapazität bewirkt, wie die nachfolgende Gleichung zeigt, das Umgekehrte:

$$\frac{(E_1)_{max}}{\sqrt{w^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}} \sin(\omega t + \psi_1) + \frac{(E_3)_{max}}{\sqrt{w^2 + \frac{1}{9C^2\omega^2}}} \sin(3\omega t + \psi_3)$$
$$+ \frac{(E_5)_{max}}{\sqrt{w^2 + \frac{1}{25C^2\omega^2}}} \sin(5\omega t + \psi_5) \ldots$$

Die Kapazität verstärkt also in der Stromkurve die Höcker bezw. die oberen Schwingungen der Spannungskurven.

In Fig. 234 ist die zu der mit dreifachem Höcker behafteten Kurve e der elektromotorischen Kraft gehörigen Stromkurve i aufgezeichnet, die bei-

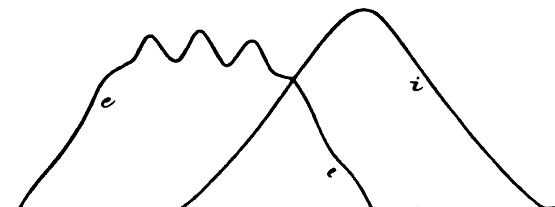


Fig. 234.

nahe sinusförmig verläuft. Nach dem Gesagten können also die Abweichungen der elektromotorischen Kraft von der Sinusform verhängnisvoll werden und zwar nicht allein wegen der Steigerung der zugehörigen Stromamplituden, sondern auch, weil sie Veranlassung zu sogenannten Resonanzerscheinungen geben können, welche eintreten, sobald für irgend eine Schwingung von der Periode n, $3n$ ... angenähert

§ 74. Resonanz.

$$\frac{1}{C\omega} = L\omega$$

wird. Die Spannungen, die dabei im Netz auftreten, können weit grösser sein als die Klemmenspannung E_k. Bei hintereinander geschalteter Selbstinduktion und Kapazität findet sich für die Spannung an den Klemmen des Kondensators (w totaler Widerstand)

$$E_c = \frac{E_k}{\omega C w} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

und für diejenigen an den Klemmen der Selbstinduktion

$$E_s = \frac{\sqrt{w^2 + \omega^2 L^2}}{w} E_g. \qquad \ldots \ldots \quad (26)$$

Aus den Spannungen lassen sich die auftretenden Ströme ermitteln.

Sind Kapazität und Selbstinduktion parallel geschaltet, so ergeben sich ganz entsprechende Stromsteigerungen im Netze gegenüber dem Maschinenstrom J: (w gehört zu L)

$$\left.\begin{aligned} J_c &= \frac{\omega C \sqrt{w^2 + \omega L^2}}{\sqrt{(1 - \omega^2 CL)^2 + \omega^2 C^2 w^2}} J. \\ J_s &= \frac{J}{\sqrt{(1 - \omega^2 CL)^2 + \omega^2 C^2 w^2}}. \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (27)$$

Steinmetz giebt allerdings an, dass beispielsweise zur Resonanz ein drittes harmonisches Glied gehört, das 70 Proc. vom ersten, ein fünftes, das 25 Proc. und ein siebentes, das 50 Proc. vom ersten ist, Werte, die praktisch selten erreicht werden.

21. Grundbeziehungen in komplexen Grössen.

§ 75. Komplexe Grössen.

Steinmetz behandelt in seinem Werke „Alternating-Current Phenomena" die Wechselstromprobleme mit komplexen Grössen. Die Impedanz bezeichnet er mit $Z = r - jx$, wobei r der bis jetzt mit w bezeichnete Widerstand und x der Ausdruck ist

$$2\pi n L - \frac{1}{2\pi n C}.$$

Die Grössen für die Maschinen selbst werden mit r_0, x_0 bezeichnet, diejenigen des Verbrauchstromkreises mit r, x. Dann lässt sich für die effektive Stromstärke schreiben:

$$J = \frac{E}{Z_0 + Z} = \frac{E}{(r_0 + r) - j(x_0 + x)} = \frac{E}{\sqrt{(r_0 + r)^2 + (x_0 + x)^2}}$$

und für die Klemmenspannung

$$E_k = JZ = E - JZ_0 = \frac{E(r - jx)}{(r_0 + r) - j(x_0 + x)}$$

$$= \frac{E\sqrt{r^2 + x^2}}{\sqrt{(r_0 + r)^2 + (x_0 + x)^2}} = E\left\{1 - \frac{r_0 r + x_0 x}{r^2 + x^2} + \frac{2(r_0 r + x_0 x) - (r_0 x + x_0 r)}{2(r^2 + x^2)} \mp + \ldots\right\}.$$

22. Leistung einer Wechselstrommaschine bei beliebigem Kurvenverlauf. Maximum der Arbeit.

§ 76. Leistung allgemein.

Verlaufen Strom und Spannung nicht sinusförmig, so gilt für die sekundliche Arbeit dennoch:

$$\frac{1}{T}\int_0^T e\,i\,dt,$$

welche Integration in jedem Falle graphisch unter Benutzung der aufgezeichneten Kurven für *e* und *i* geschehen kann, siehe Fig. 235, worin die gestrichelte Linie die Arbeitskurve darstellt, die z. B. planimetrisch integriert werden kann. Kennt man die Effektivwerte der verschiedenen harmonischen

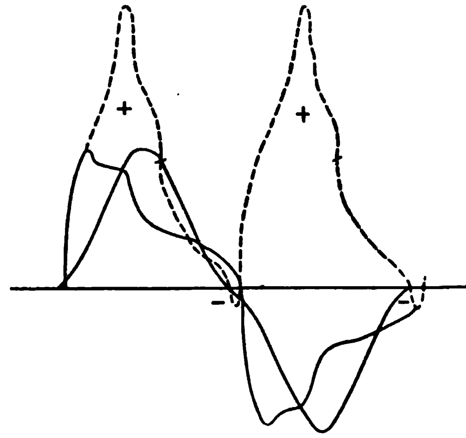


Fig. 235.

Glieder für Strom und Spannung J_1, E_1; J_3, E_3 . . . und deren Phasenwinkel φ_1, φ_3 . . ., so ist die Gesamtarbeit einfach:

$$J_1\, E_1 \cos \varphi_1 + J_1\, E_3 \cos \varphi_3 + \ldots \quad . \; . \; . \; . \quad (28)$$

Gewöhnlich wird dafür unter Verwendung sogenannter äquivalenter Sinusschwingungen gleichen Effektivwertes gesetzt:

$$E J \cos \Phi.$$

Φ ist eine ideelle Phasenverschiebung.

Unter Voraussetzung einfacher Sinusschwingungen oder bei Ersatz der § 77. Maximum der Leistung.
thatsächlichen Kurven durch äquivalente Sinusschwingungen von gleichem Effektivwerte und unter Vernachlässigung der Kapazität findet sich für einen bestimmten Widerstand w des gesamten Stromkreises ein Maximum für die elektrische Leistung bei

$$w = 2 \pi n L$$

und zwar vom Betrage

$$A = \sqrt{J^2 E^2 - 4 \pi^2 n^2 J^4 L^2}. \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (29)$$

Das Verhältnis scheinbare Arbeit JE: thatsächliche Arbeit A ist

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707.$$

Es ist dabei

$$J = \frac{E}{2 \sqrt{2 \pi n L}}$$

und der Phasenwinkel findet sich aus

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi n L}{w} = 1$$

zu 45°.

Das Maximum der Nutzarbeit liegt allerdings an anderer Stelle; es tritt ein, wenn der äussere Widerstand w_a mit dem Ankerwiderstand w_i und der Selbstinduktion $L_i \cdot 2\pi n$ der Maschine verknüpft ist durch

$$w_a = \sqrt{w_i^2 + 4\pi^2 n^2 L_i^2}.$$

Der Wirkungsgrad ist dann

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{w_i}{w_a}}$$

grösser als 0,5.

§ 78. Leistung in Voltampère. Aus den bisherigen Erörterungen geht hervor, dass die Leistung einer Wechselstrommaschine nicht durch Strom und Spannung gegeben ist, nicht durch ihre Voltampère, sondern durch die Voltampère mal cos Φ = Watt.

Da jedoch eine gegebene Maschine der Erwärmung halber bei einer bestimmten Spannung nur eine gewisse grösste Stromstärke abgeben kann, so ist die Leistungsfähigkeit einer Wechselstrommaschine durch das Produkt JE festgelegt. Sie wird für eine Wattleistung $JE \cdot \cos\varphi$, d. h. für ihre Voltampèreleistung verkauft. Ein Netz mit kleinem Leistungsfaktor verlangt also bei gleichem Kraftverbrauch in Watt eine grössere Maschine als ein solches mit geringer Phasenverchiebung. Kraftnetze erfordern bei gleicher Leistung stets Maschinen, die 10—30 Proc. grösser sind, als solche für Lichtnetze.

23. Konstante Spannung. Konstante Stromstärke.

§ 79. Konstante Spannung. Mit Rücksicht auf die Klemmenspannung sei noch erwähnt, dass dieselbe für Maschinen mit geringem Widerstand und geringer Selbstinduktion bei allen Belastungen annähernd konstant und gleich der elektromotorischen Kraft bleibt:

§ 80. Konstanter Strom. Maschinen für konstante Spannung. Für bestimmte Zwecke, z. B. für Hintereinanderschaltung von Bogenlampen kann es jedoch wünschenswert werden, einer Wechselstrommaschine bei konstanter elektromotorischer Kraft konstante Stromstärke und variable Klemmenspannung zu entnehmen. Dies wird dadurch erreicht, dass die Selbstinduktion der Maschine gegenüber dem Widerstand des gesamten Kreises gross gewählt wird; dann ist angenähert unabhängig von der Belastung w der Strom

$$J = \frac{E}{2\pi n L}.$$

Bei offenem Stromkreis ist dann allerdings die Maschinenspannung ein Vielfaches der Klemmenspannung bei Belastung.

24. Einfluss des Eisens in Wechselstrommaschinen. Lichtbogen.

§ 81. Stromverzerrung durch Hysteresis. Die bisherigen Erörterungen gelten streng genommen nur für Maschinen ohne Eisen, also für Maschinen ohne Hysteresis- und Wirbelstromverlust und ohne variable Selbstinduktionskoeffizienten. Jeder Stromkreis, der zu magnetisierendes Eisen enthält, bedingt wegen der mit der Grösse der Induktion

stark veränderlichen Permeabilität und wegen der Hysteresis, allgemein gesprochen wegen der pulsierenden Reaktanz, eine Deformation der Stromkurve gegenüber der Spannungskurve der Wechselstrommaschine. Bei Voraussetzung von magnetischem Material ohne Hysteresis, aber von der üblichen variablen Permeabilität findet sich für den Magnetisierungsstrom i, der zu der fast sinusförmigen Spannungskurve Fig. 236 gehört, der spitze Verlauf, der daneben gezeichnet ist. Die Hysteresis bedingt eine einseitige Verzerrung der Stromkurven, wie dies aus den Figg. 237—239 zu ersehen ist.



Fig. 236.

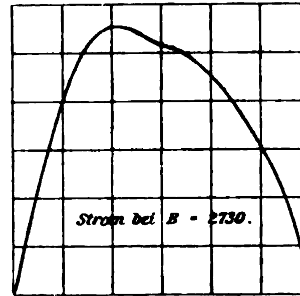


Fig. 237.

Die zugehörige Spannungskurve verläuft nach Fig. 124 ziemlich sinusförmig. Die Stromkurven wurden an einem unterteilten Eisenring aufgenommen und zwar Fig. 237 bei einer Induktion $B = 2730$, Fig. 238 bei $B = 6680$ und die letzte bei $B = 13\,160$. Die Zerlegung der letzten Stromkurve (Fig. 239) liefert den Wert in Amp.

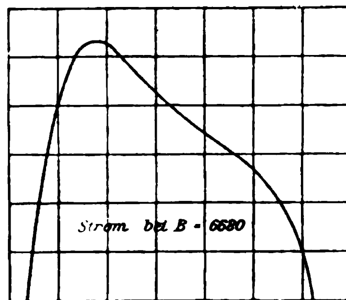


Fig. 238.

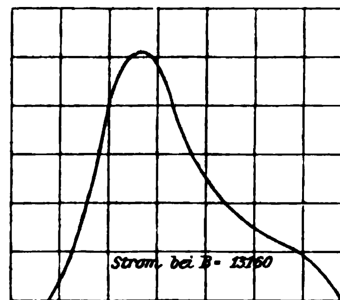


Fig. 239.

$$14{,}54 \sin(\omega t - 19^0 10') + 4{,}94 \sin(3\omega t + 67^0 20') + 1{,}31 \sin(5\omega t + 155^0 40')$$

während die Spannungskurve in Volt ist

$$209{,}3 \sin(\omega t + 47^0 40') + 20{,}4 \sin(3\omega t + 229^0 0') + 7{,}4 \sin(5\omega t + 178^0 55').$$

Hat der betreffende Stromkreis im wesentlichen nur die Ummagnetisierungsarbeit zu leisten, so fällt das Maximum der Stromkurve annähernd mit dem Werte Null der Spannungskurve zusammen. STEINMETZ ersetzt die durch Hysteresis verzerrte Stromwelle durch eine sogenannte äquivalente Sinuswelle, die gegen die Spannung um $90^0 - \alpha$ verschoben ist, derart, dass $JE \sin \alpha$ die Hysteresisarbeit A_H darstellt. Unter Voraussetzung der Beziehung

$$A_H = \eta B^{1,6}$$

zwischen Hysteresisarbeit pro Periode und Kubikcentimeter in *Erg* und der Induktion B findet sich

$$\sin \alpha = \frac{4 \mu \eta}{B^{0,4}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (30)$$

wobei μ die Permeabilität bedeutet.

Die Verzerrung durch Hysteresis ist nur deutlich bemerkbar, wenn der betreffende Stromkreis keine andere als hysteretische Belastung enthält, also im wesentlichen für leerlaufende Transformatoren und eventuell in geringerem Masse für leerlaufende Motoren. Bei Belastung der Wechselstromapparate und auch schon, wenn in den magnetischen Kreis ein Luftzwischenraum eingeschaltet wird, nähern sich die Stromkurven den Spannungskurven. Wirbelströme verzerren die Stromkurve im allgemeinen nicht. Sie bedingen jedoch eine Phasenverschiebung, die von dem Verhältnis des Widerstandes zur sogenannten Reaktanz $2 \pi n L$ des Materials, in dem Wirbelströme entstehen, abhängt:

$$tg\, \varphi_w = \frac{2 \pi n L}{w}.$$

§ 82. Verzerrung der Stromkurve durch pulsierenden Widerstand.

Auf eine typische Verzerrung der Stromkurve durch äusseren Widerstand ist hier noch hinzuweisen, nämlich auf die durch den elektrischen

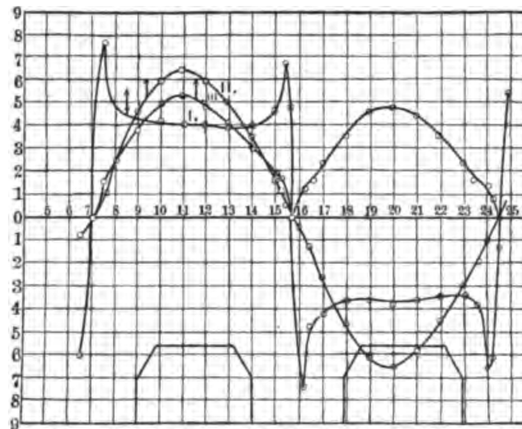


Fig. 240.

Lichtbogen verzerrten Ströme. Der Widerstand des Lichtbogens ist bei geringer Stromstärke gross und sinkt mit zunehmendem Strom, sodass sich, Fig. 240, eine eigenartig geformte Spannungskurve I findet, die sehr steil von Null ansteigt und zwei Spitzen bildet, von denen sie sich wieder einsenkt. Die ziemlich sinusförmige Stromkurve II ist ebenfalls, ebenso wie die Arbeitskurve III eingetragen. Eine Phasenverschiebung ist nicht vorhanden, aber der Leistungsfaktor, d. h. das Verhältnis der Watt zu den Voltampère ist kleiner als 1.

§ 83. Darstellung der Eisenverluste im Diagramm.

Zurückkehrend zu den Hysteresis- und Wirbelstromverlusten ist noch festzustellen, dass man dieselben in vereinfachter Weise in die Gleichungen und Diagramme einzuführen pflegt. Tritt nämlich zwischen Spannung und Strom eine Phasenverschiebung φ auf, so kann man entweder (Fig. 241) die Spannung OE in zwei senkrechte Komponenten zerlegen oder den Strom OJ. Im ersten Falle handelt es sich um eine Spannungskomponente $OE_p = OE \cos \varphi$ in

Richtung des Stromes, um eine Arbeitskomponente, und um eine senkrecht dazu $EE_p = OE \sin \varphi$, die wattlose (déwatté), für Selbstinduktion und Kapazität aufzuwendende. Im letzteren Falle spricht man von einem Arbeitsstrom $OJ_p = OJ \cos \varphi$ in Richtung der Spannung und einem wattlosen Strom $JJ_p = OJ \sin \varphi$ senkrecht zur Spannung, von einem Magnetisierungsstrom.

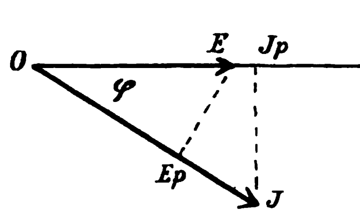


Fig. 241.

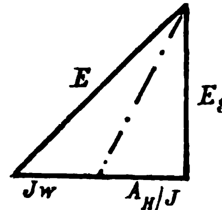


Fig. 242.

Beide Anschauungen haben wohl ihre Berechtigung. Die Hysteresisverluste A_H lassen sich nun in einem Falle als Arbeitsspannung von der Grösse $\frac{A_H}{J}$ einfach zur Spannungskomponente in Richtung der Stromstärke (Fig. 242) oder im andern Falle als Arbeitsstrom von der Grösse $\frac{A_H}{E}$ zu der Arbeitskomponente der Stromstärke schlagen. In Fig. 242 ist E_s die *EMK* der Selbstinduktion und Jw der Ohm'sche Abfall, E die resultierende Spannung. Für die Wirbelstromverluste A_w gilt dasselbe wie für A_H.

25. Oberflächenwirkung.

In einem Leiter der von Wechselstrom durchflossen wird, entsteht ein cirkulares Wechselfeld, das vom Zentrum des Leiters ab nach aussen abnimmt. Dieses Feld drängt den Strom von den inneren Leiterteilen ab gegen die Oberfläche, verursacht also eine Schirmwirkung (skineffect). Der gewöhnliche, Ohm'sche Widerstand $\sigma \frac{l}{q}$ ist deshalb für Wechselstrom durch einen grösseren Wert zu ersetzen, eine Thatsache die besonders für starke Leiter, also für Niederspannungsmaschinen zu berücksichtigen ist. Sofern w der Ohm'sche Widerstand ist, wird der Widerstand für Wechselstrom allgemein ausgedrückt durch § 84. Wechselstromwiderstand.

$$w_w = w \left[1 + \frac{a^2}{12} - \frac{a^4}{180} \pm \ldots\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

wobei $a = 2\pi n \frac{\mu l}{w}$, l die Leiterlänge und μ die Permeabilität ist. Für runden Kupferdraht vom Durchmesser d in Centimeter lässt sich vereinfachend schreiben

$$w_w = w\,[1 + 7{,}5\, d^4 n^2 \cdot 10^{-7}]. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

Nach Brylinski ist zu setzen

$$w_w = w \cdot 3{,}15\, \frac{d}{2} \sqrt{\mu \sigma n} + 0{,}266. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (33)$$

Bei einer Frequenz von Achtzig soll der Wechselstromwiderstand eines runden Kupferdrahtes beliebiger Stärke nie unter denjenigen gebracht werden können, den ein 14 mm starker als reinen Ohm'schen besitzt.

§ 85. Wechselstromreaktanz.

Auch die Selbstinduktion wird in gleicher Weise beeinflusst. Der Selbstinduktionskoeffizient für Wechselstrom ist

$$L_w = L - \mu l \left[\frac{a^2}{48} - \frac{13 a^4}{8640} \pm \ldots \right] \quad \ldots \quad (34)$$

worin a, μ, l die angegebene Bedeutung haben und L der übliche Selbstinduktionskoeffizient ist.

Ein Kondensator zeigt für Wechselstrom eine kleinere Kapacität als für Gleichstrom (E. T. Z. 1894, S. 449).

26. Variabler Selbstinduktionskoeffizient.

§ 86. Selbstinduktionskoeffizient bei Spulen mit Eisen.

Ist der Selbstinduktionskoeffizient einer Spule variabel, so lässt sich die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion allgemein darstellen durch

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{d(Li)}{dt} \\ \text{oder durch} \\ L\dfrac{di}{dt} + i\dfrac{dL}{di}\dfrac{di}{dt} \end{array}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (35)$$

Ein variabler Selbstinduktionskoeffizient gestaltet also die früher entwickelten Gleichungen für Wechselstromkreise sehr kompliziert, ja er macht sie genau genommen unlösbar. Da bei allen Wechselstromapparaten mit Eisen das L variabel wird, so ist es am besten den Selbstinduktionskoeffizienten aus den Betrachtungen möglichst zu eliminieren.

Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ist bedingt durch die Kraftlinienänderung $\frac{dK_t}{dt}$ des in der Spule von z Windungen erzeugten Feldes K_t und ist ausgedrückt durch $z\,\frac{dK_t}{dt}$, also

$$\frac{d(Li)}{dt} = z\,\frac{dK_t}{dt} \text{ oder } L = z\,\frac{dK_t}{di}.$$

K_t ist jedoch bekanntlich $\dfrac{\frac{4\pi i z}{10}}{\Sigma \frac{1}{\mu}\frac{l}{q}}$, worin der Nenner den magnetischen Widerstand der Spule bedeutet; sonach resultiert

$$L = \frac{1{,}26\, z^2}{\Sigma \frac{1}{\mu}\frac{l}{q}} = \mu L', \quad \ldots \ldots \quad (36)$$

wenn L' für die Spule ohne Eisen gilt.

Der obige Ausdruck $\frac{d(Li)}{dt}$ lässt sich damit auch schreiben

$$\frac{L'\,d(\mu i)}{dt} = \left(\mu + i\,\frac{d\mu}{di}\right) L'\,\frac{di}{dt}.$$

Hat man die Charakteristik der Maschine, so ist der Nenner $\Sigma \frac{1}{\mu}\frac{l}{q} \cdot 0{,}8$ des Ausdrucks für den Selbstinduktionskoefficienten gleich $tg\,\varphi$ Fig. 243 und der Winkel φ giebt ein Mass für die Veränderlichkeit des Selbstinduktionskoeffizienten mit der Induktion.

Der Selbstinduktionskoeffizient L eines Ankers einer Wechselstrommaschine mit $2s$ hintereinandergeschalteten Spulen zu z Windungen ist § 87. Selbstinduktionskoeffizient eines Ankers.

$$L = 2s \cdot z^2 \Sigma \frac{1{,}26}{\frac{1}{\mu} \frac{l}{q}} \cdot 10^{-8} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (37)$$

wobei für μ eben ein mittlerer Wert einzusetzen ist, um einen Mittelwert für L zu erhalten.

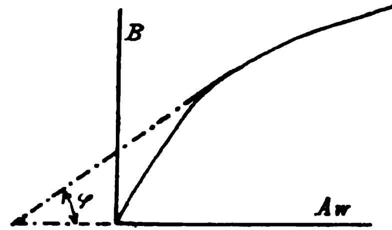


Fig. 243.

Da die Stromstärke, die eine Wechselstrommaschine abgeben kann, mit zunehmender Selbstinduktion abnimmt, bezw. der Spannungsabfall mit ihr zunimmt, so ist man bestrebt L möglichst klein zu halten. Man hat zu diesem Zwecke wenig Windungen und starke Felder zu wählen und den magnetischen Widerstand des Ankerfeldes möglichst gross zu halten, also weite, offene, nicht tiefe Nuten und grossen Luftzwischenraum zu verwenden. Eine stark unterteilte Wicklung, also eine solche mit vielen Spulen, die wenig Windungen haben, ergiebt nach der Beziehung (35) einen kleineren Selbstinduktionskoeffizienten als eine Wicklung mit wenig Spulen, die viele Windungen enthalten.

27. Günstigste Leiterzahl.

Wie früher für einen bestimmten äusseren Widerstand die maximale Leistung einer Wechselstrommaschine berechnet wurde, so lässt sich auch mit Rücksicht auf die Selbstinduktion die Leiterzahl einer Wechselstrommaschine bestimmen, bei der die Leistung ein Maximum wird. Unter Vernachlässigung des Maschinenwiderstandes und wenn man den Selbstinduktionskoeffizienten eines Leiters, deren Z vorhanden seien, mit L_1 und die elektromotorische Kraft pro Leiter mit E_1 bezeichnet, findet sich als Bedingung für das Maximum der Nutzspannung der Wechselstrommaschine[1]), die auf den Nutzwiderstand w arbeitet, § 88. Günstigste Ankerleiterzahl.

$$\frac{d(Jw)}{dZ} = \frac{d\sqrt{E_1^2 Z^2 - 4\pi^2 n^2 J^2 Z^4 L_1^2}}{dZ} = 0$$

$$Z = \frac{E_1}{2\sqrt{2}\,\pi\, n\, J\, L_1}.$$

oder, wenn der Wert für E_1 eingesetzt wird,

$$Z = \frac{1{,}1 \cdot K}{10^8 \sqrt{2}\,\pi J L_1} = \frac{k}{J L_1} 0{,}78 \cdot 10^{-8} \quad \ldots \ldots \quad (38)$$

1) JACKSON, Alternating Currents S. 237.

Statt 1,1 tritt bei Abweichung von der Sinusform der Formfaktor $\frac{c}{2}$. Wenn der äussere Stromkreis induktive Belastung enthält, so wird die günstigste Leiterzahl Z' etwas anders, nämlich

$$Z' = Z\left(1 - \frac{L_a}{Z^2 L_1}\right)^{1/2} \quad \ldots \ldots \quad (39)$$

worin Z der oben erwähnte Ausdruck, L_a der Selbstinduktionskoefficient des äusseren Stromkreises und L_1 der bereits verwendete Wert ist.

28. Grösse des Selbstinduktionskoeffizienten der Wechselstrommaschinen.

§ 89. Selbstinduktionskoeffizient einer Wechselstrommaschine.

Die Ermittlung der Selbstinduktionskoeffizienten von Maschinen ist stets ziemlich unbestimmter Natur, man muss sich mit gewissen Mittelwerten bezw. Effektivwerten zufrieden geben. Man kann ja allerdings z. B. für eine gegebene Hysteresisschleife die sämtlichen Werte $\frac{dK}{di}$ bezw. $\frac{dB}{di} = \operatorname{tg} \varphi$ (Fig. 243) ermitteln und damit den Verlauf des Wertes von L finden.[1]) Wenn in einem bestimmten Stromkreise der Ohm'sche Widerstand zu vernachlässigen ist, so ergiebt sich ein gewisser Effektivwert für L aus

$$L = \frac{E}{\left(\frac{di}{dt}\right)_{eff.}}$$

$$\text{wobei} \quad \left(\frac{di}{dt}\right)_{eff.} = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{T/2} \left(\frac{di}{dt}\right)^2 dt.}$$

Die übliche Berechnung von L aus einem effektiven Wechselstrom J und einer effektiven Wechselspannung E erheischt bei Abweichungen von der Sinusform einen gewissen Korrektionsfaktor. Es ist nämlich bei vernachlässigbarem Widerstand nach H. F. Weber[2])

$$L = \frac{E}{2\pi n J}\sqrt{\frac{1 + \frac{1}{9}\frac{E_3^2}{E_1^2} + \frac{1}{25}\frac{E_5^2}{E_1^2} + \ldots}{1 + \frac{E_3^2}{E_1^2} + \frac{E_5^2}{E_1^2} + \ldots}} \quad \ldots \ldots \quad (40)$$

wobei E_1, E_3 . . die Amplituden der Partialschwingungen der Spannungskurve sind. Der Korrektionsfaktor erweist sich selbst bei ziemlicher Abweichung von der Sinusform als nicht gross, z. B. für die Spannungskurve

$$100 \sin(2\pi nt - 7{,}0^0) + 38{,}4 \sin(6\pi nt + 144{,}1^0) + 15{,}6 \sin(10\pi nt - 75{,}9^0) + \ldots$$

findet sich der Wert 0,932. Es sei gleich hier erwähnt, dass bei Ermittlung einer Kapazität nach dieser Methode

$$C = \frac{J}{2\pi n E}\sqrt{\frac{1 + \frac{E_3^2}{E_1^2} + \frac{E_5^2}{E_1^2} + \ldots}{1 + 9\frac{E_3^2}{E_1^2} + 25\frac{E_5^2}{E_1^2} + \ldots}} \quad \ldots \ldots \quad (41)$$

1) Du Bois, Magnetische Kreise S. 237.
2) Wied. Ann. 63 S. 366.

der Korrektionsfaktor ganz wesentlich grösser ist; er wird nämlich für die gleiche Spannungskurve 0,632.

Werte der Selbstinduktionskoeffizienten gebräuchlicher Wechselstrommaschinen sind zur Orientierung nachstehend zusammengestellt: § 90. Beispiele von Selbstinduktionskoeffizienten.

MORDEY-Maschine ohne Eisen, $L = 0,038$ Henry, Spulenmitte mit Polmitte zusammenfallend, und $L = 0,036$, Mitte Spulenmitte mit Pollücke zusammen-

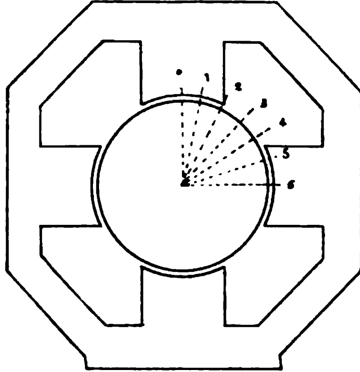


Fig. 244.

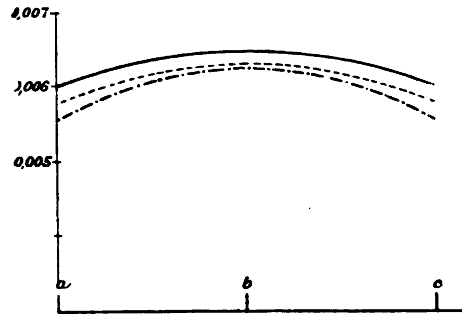


Fig. 245.

fallend. Bei voller Erregung der Magnete wird L 14 Proc. kleiner. Die vierpolige Wechselstrommaschine Fig. 244 hat nach PICHELMEYER in den verschiedenen Stellungen des Ankers folgende Werte für den Selbstinduktionskoeffizienten:

Stellung	L
0	0,00527
1	0,00512
2	0,00471
3	0,00449
4	0,00471
5	0,00509
6	0,00527

Als Mittel findet sich 0,00488; die Variation lässt sich darstellen durch die Gleichung

$$L = 10^{-5}(48,8 + 3,9 \cos 4\alpha).$$

Die Messungen bezogen sich auf geringen Ankerstrom, bei vierfachem Ankerstrom stellte sich im Mittel 0,0050 ein. Der Ringanker der KAPP'schen Wechselstrommaschine (Fig. 97) ergab 0,69 Henry bei 1,94 Ohm und ein anderer bei 7 Ohm 0,0977. Ein FERRANTI-Alternator zeigte im Mittel 0,0012 Henry. An einer Scheibenarmatur von SIEMENS & HALSKE (Fig. 46) fand der Verfasser[1]) für den Selbstinduktionskoeffizienten die drei Kurven Fig. 245. Das Maximum gilt immer für die Stellung der Spule gegenüber einem Pol; das Minimum tritt ein, wenn die Spule zwischen zwei Polen steht. Die beiden oberen Kurven gelten für die unerregte Maschine und für die Ankerströme 20 und 40 Ampère. Bei dem normalen Erregerstrom und dem Ankerstrom von 40 Ampère stellt sich die untere Kurve ein.

1) Aufgenommen im elektrotechnischen Institut Stuttgart.

29. Stromstärke und Leistung von Mehrphasenmaschinen.

§ 91. Stromstärke in Mehrphasensystemen. Die Stromstärken und Arbeitsbeträge für Mehrphasenwicklungen bestimmen sich in gleicher Weise wie früher die elektromotorischen Kräfte. Bei Dreiphasenwicklungen in Sternschaltung ist Phasenstrom und Leitungs-(Netz-)strom identisch, bei Dreieckschaltung ist der Leitungsstrom $\sqrt{3}$ mal grösser als derjenige einer Phase. Verbindet man zwei Rückleitungen eines Zweiphasensystems miteinander, so fliesst in der gemeinsamen Leitung ein Strom, der $\sqrt{2}$ mal grösser ist als in den zwei übrigen Leitungen; dasselbe gilt für die geschlossene, verkettete Zweiphasenschaltung (Fig. 153). Für die mehrphasigen Stromstärken, die Gleichstromankern entnommen werden kann, gilt nach FRIESE die Beziehung: der effektive Strom in einer Leitung ist

$$J_l = 2 \sin \frac{\pi}{p'} \cdot J_a \quad \ldots \ldots \ldots \quad (42)$$

wobei p' die Phasenzahl und J_a der Strom in der Ankerwicklung zwischen zwei Schleifringen ist. Für letzteren gilt in Beziehung auf den Gleichstrom gleiche Stromwärme vorausgesetzt.

$$J_a = \tfrac{1}{2} J_g.$$

Bei offener Verkettung ist für alle Phasen der Leitungsstrom gleich dem Ankerstrom und bei gleicher Stromwärme gleich dem halben Gleichstrom.

Für die Momentanwerte der Ströme $i_1\ i_2 \ldots i_{p'}$ in den p'-Leitungen eines p'-Phasensystems gilt:

$$i_1 + i_2 + \ldots i_{p'} = o.$$

§ 92. Leistung von Mehrphasenmaschinen. Für die Leistung eines gegebenen Ankers in Watt für Mehrphasenstromabgabe findet sich bei offener oder geschlossen verketteter Schaltung gegenüber der Gleichstromleistung A_g die Beziehung

$$A_w = \frac{p'}{2\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{p'} A_g. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (43)$$

Die Leistung bei Entnahme von einphasigem Wechselstrom ist nach dieser Gleichung um etwa 30 Proc. geringer als bei Gleichstrom. Für zwei und vier Phasen ist die Mehrphasen- und die Gleichstromleistung dieselbe; bei unendlich vielen Phasen stellt sich die maximale Ausgiebigkeit der Wicklung ein:

$$A_w\big|_{p' = \infty} = 1{,}111\ A_g.$$

Die Grösse des Leitungsstromes und des Ankerstromes zwischen zwei Schleifringen unter Voraussetzung der Gleichheit des Wechselstrom- und Gleichstromeffektes sind nachstehend für einige Phasen nach STEINMETZ zusammengestellt (geschlossene Wicklung):

	Gleichstrom	Einphasig	Dreiphasig	Vierphasig	Sechsphasig	Zwölfphasig	p'-phasig
Leitungsstrom J_l	1,00	1,414	0,948	0,707	0,472	0,238	$\frac{2\sqrt{2}}{p'}$
Ankerstrom J_a	1,00	1,414	0,545	0,5	0,472	0,455	$\frac{\sqrt{2}}{p' \sin \frac{\pi}{p'}}$

Ist $J_{p'}$ der Phasenstrom, $E_{p'}$ die Phasenspannung und φ der Winkel zwischen beiden, so ist ganz allgemein die Leistung der Mehrphasenmaschine

$$p' J_{p'} E_{p'} \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (44)$$

Kennt man nur die Leitungsströme J_l und Leitungsspannungen E_l, so ist die Leistung der Wechselstrommaschine in diesen ausgedrückt:

$$\frac{p'}{2 \sin \frac{\pi}{p'}} J_l E_l \cos \varphi, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (45)$$

wo φ auch wieder der Winkel zwischen $E_{p'}$ und $J_{p'}$ ist.

Die Leistung einer Einphasenmaschine pulsiert fortwährend von Null zu einem Maximum (bei $\cos \varphi = 1$) oder von einem negativen zu einem positiven Maximum und zwar mit doppelter Frequenz und $J E_k \cos \varphi$ ist nur ein Mittelwert. Bei einer Drehstrommaschine ist der Gesamteffekt dagegen dauernd konstant, wenn die einzelnen Zweige gleich belastet sind. Pulsiert der Gesamteffekt, so spricht man von einem unausgeglichenen Mehrphasensystem, pulsiert er nicht, von einem ausgeglichenen. Das Verhältnis des Minimal- zum Maximalwert des Effektflusses nennt STEINMETZ Ausgleichsfaktor (balance factor). § 93. Ausgeglichene und unausgeglichene Mehrphasensysteme.

30. Betriebskurven.

Zur Erläuterung der vorstehenden theoretischen Auseinandersetzungen folgen nun eine Reihe Betriebskurven von Wechselstrommaschinen. § 94. Leerlaufcharakteristik.

Die Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft bei Leerlauf vom Erregerstrom, die sogenannte Maschinencharakteristik, ist in Fig. 246 gezeichnet. Die Abscissen entsprechen den erregenden Ampèrewindungen und die Ordi-

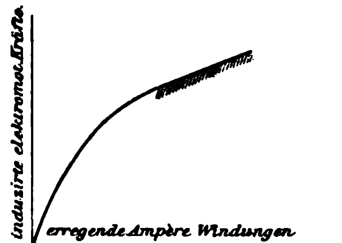


Fig. 246.

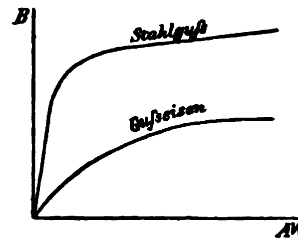


Fig. 247.

naten der Induktion B; die Kurve steigt zunächst geradlinig an, um sich mit zunehmender Eisensättigung asymptotisch einer horizontalen Geraden zu nähern. Die Kurven für die Maschinencharakteristik fallen verschieden aus, je nachdem das Magnetgestell aus Gusseisen oder Stahlguss besteht, siehe Fig. 247: Bei Stahlguss ist das Knie der Kurve stets viel ausgesprochener als bei Gusseisen.

Bei konstanter Erregung lässt sich in Abhängigkeit des äusseren Stromes die jeweilige Klemmenspannung aufzeichnen; diese Kurve (Fig. 248), eine Viertelellipse, heisst die äussere Maschinencharakteristik. Aus irgend einem Punkte M kann man jederzeit den induktiven Abfall in der Maschine be- § 95. Äussere Maschinencharakteristik.

stimmen. Man macht MN = dem OHM'schen Abfall in der Maschine. Ein Lot auf IM in N schneidet einen Kreisbogen aus I mit der Leerspannung als Radius in P; das Lot PN stellt die früher mit $2\pi n L J$ bezeichnete Grösse dar. Die Charakteristik Fig. 249 entspricht einer MORDEY-Maschine und beweist,

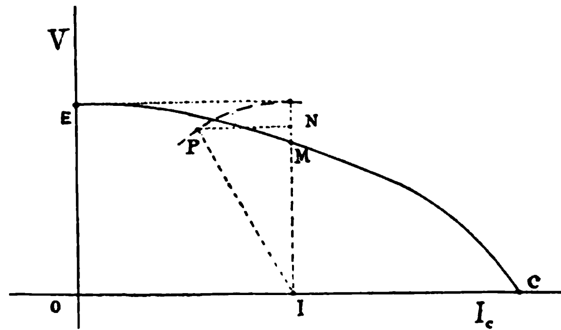


Fig. 248.

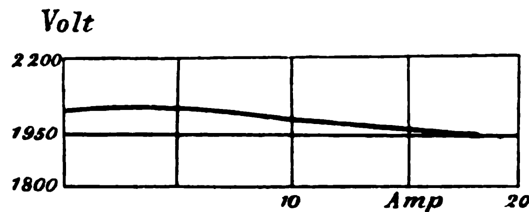


Fig. 249.

dass der Abfall dieser eisenlosen Type sehr gering ist. Die Kurven Fig. 250 vergleichen zwei Maschinen mit verschiedenem Spannungsabfall. Bei der einen Maschine ist der Spannungsabfall bei 200 Amp. nur etwa 9 Proc.; die andere

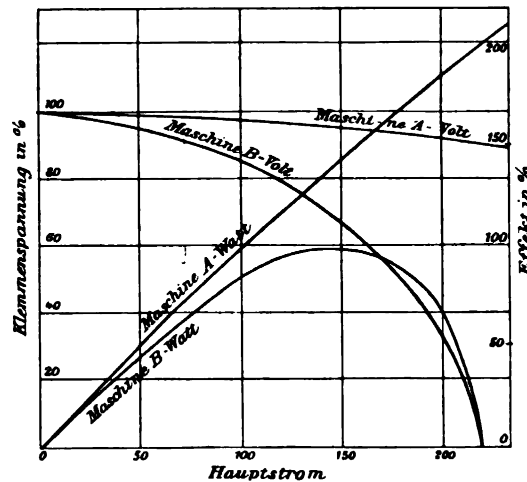


Fig. 250.

Maschine hat einen solchen von nahezu 70 Proc. Die Spannungskurve der letzten Maschine schneidet die Abscissenaxe schon bei etwa 230 Amp. Die Leistung dieser Maschine erreicht bereits bei 150 Amp. ihr Maximum; bei 230 Amp. ist ihre Leistung 0.

Eine Wechselstrommaschine von LABOUR zur Speisung von Leuchttürmen, die mit zwei Wicklungen zur Stromlieferung an zwei unabhängige Stromkreise versehen ist, ergab die Betriebskurven Fig. 251. Die Spannungs- und Arbeitskurve (1) gelten für das Arbeiten eines einzigen Zweiges; die Kurven (2) für die zwei parallel geschalteten Wicklungen. Eine neuere Maschine von

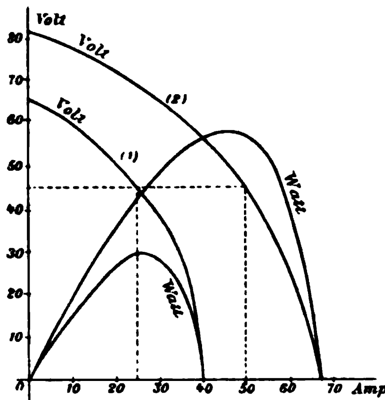


Fig. 251.

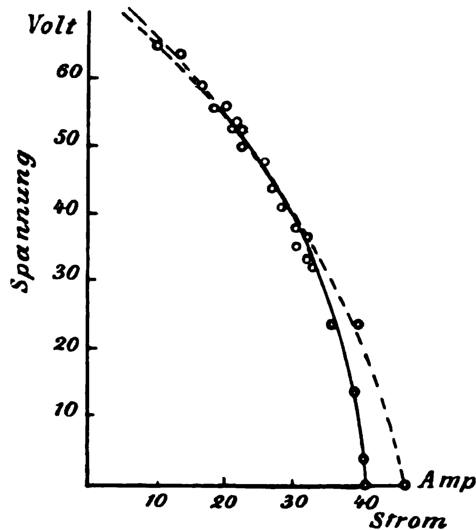


Fig. 252.

BLONDEL für den gleichen Zweck ist zweiphasig gewickelt; jede Phase speist einen Scheinwerfer. Das Ein- und Ausschalten einer Phase beeinflusst die andere sehr wenig. Die gestrichelte Kurve Fig. 252 stellt sich ein, wenn nur eine Phase belastet ist; die ausgezogene Kurve, wenn beide gleich

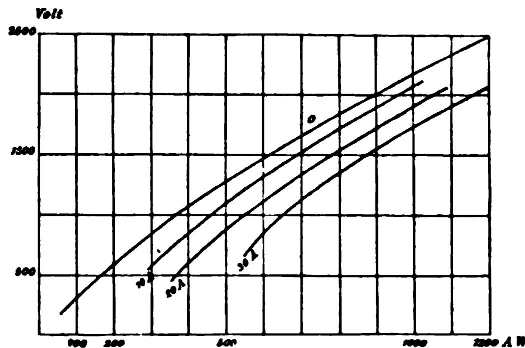


Fig. 253.

belastet sind. Beim plötzlichen Ausschalten von 25 Amp. in einer Phase schwankt die andere Phase höchstens um 1 Amp.

Nimmt man in Abhängigkeit der Erregung Kurven auf, welche bei konstanter Tourenzahl die Klemmenspannung darstellen, so ergeben sich bei Belastung Kurven, die unterhalb der Leerlaufcharakteristik liegen, und zwar um so tiefer, je grösser die äussere Stromstärke ist, und je grösser bei gleicher Stromstärke der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung ist. § 96. Betriebskurven bei verschiedener Erregung, bei konstanter Strom-

stärke, bei variabler Tourenzahl und variablem Selbstinduktionskoeffizienten.

Die Kurvenschar Fig. 253 ist an einer KAPP'schen Flachringmaschine aufgenommen und zwar die oberste für den Strom Null, die nächste für den Strom 10 Amp., dann für 20 Amp. und für 30 Amp. Zwei entsprechende Kurven für eine Innenpolmaschine von ALIOTH sind in Fig. 254 niedergelegt.

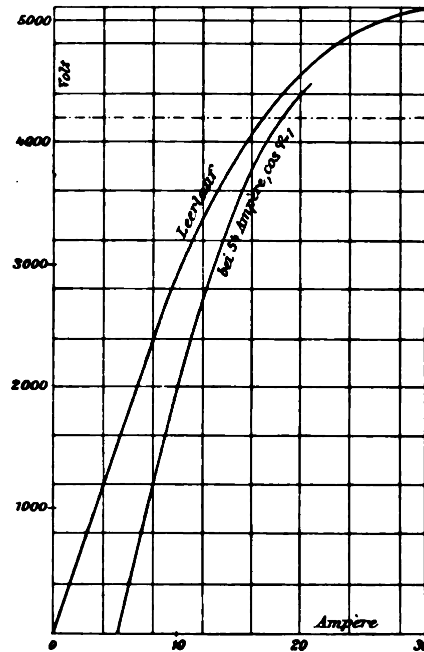


Fig. 254.

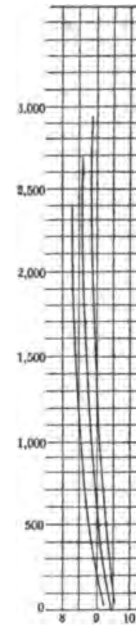


Fig. 255.

Die äussere Charakteristik einer Wechselstrommaschine für konstante Stromstärke verläuft nach Fig. 255. Sie gilt für eine Bogenlichtmaschine von STANLEY. Die Ordinaten sind ebenfalls wieder die Spannungen, die Abscissen die äusseren Stromstärken.

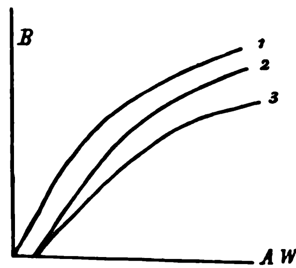


Fig. 256.

In Fig. 256 ist ein Vergleich gegeben für den Verlauf der Spannung bei Leerlauf (Kurve 1), bei Belastung induktionsfreier Natur (Kurve 2) und schliesslich für dieselbe Stromstärke bei einer Phasenverschiebung von 90° (Kurve 3). In Fig. 257 sind drei Spannungscharakteristiken nach G. KAPP gezeichnet: für $J = o$, $J = 640$ Amp. $\cos \varphi = 1$ und bei gleichem Strom für $\cos \varphi = 0{,}8$.

Der Einfluss verschiedener Tourenzahl auf die Leerlaufcharakteristik ist aus der Kurvenschar Fig. 258 ersichtlich; die Kurven der Spannung liegen um so höher, je grösser die Tourenzahl ist. Bei konstantem Erregerstrom und einer konstanten Selbstinduktion von $L = 0{,}104$ Henry verläuft bei variablem äusseren Widerstand die Stromstärke einer Wechselstrommaschine bei ver-

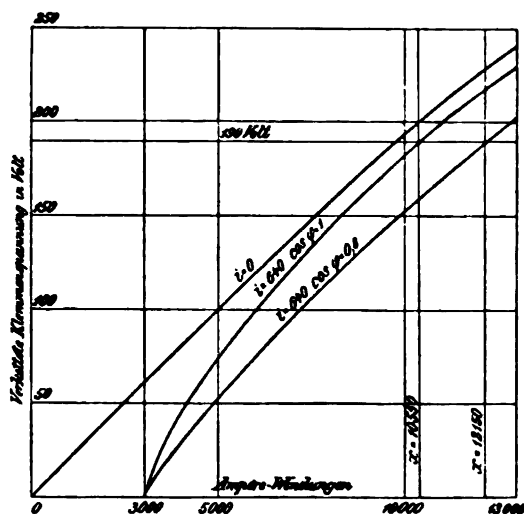


Fig. 257.

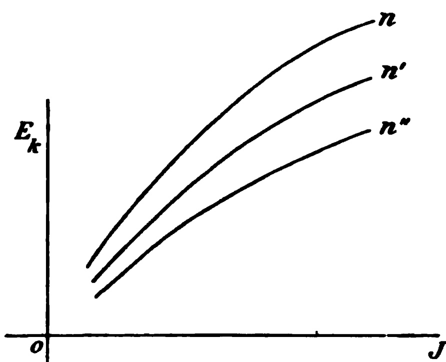


Fig. 258.

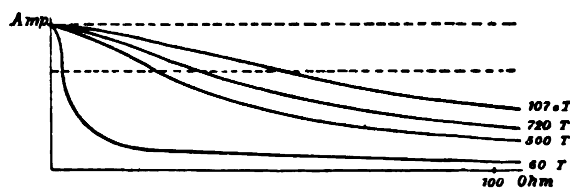


Fig. 259.

schiedenen Touren nach Fig. 259. Die Tourenzahlen für die einzelnen Kurven sind oben angefangen: 1070, 720, 500 und 60.

Die Kurvenschar Fig. 260 soll den Einfluss des Selbstinduktionskoeffizienten auf die sekundliche Arbeit einer Wechselstrommaschine in Abhängigkeit des äusseren Widerstandes klarlegen. Für Kurve *d* ist der Selbstinduktions-

koeffizient am grössten; für die Kurve c ist er nur noch halb so gross; für die Kurve b nur noch ein Viertel des ursprünglichen Wertes und für die oberste Kurve a ist er überhaupt 0. Bei der untersten Kurve tritt das Maximum der Arbeit bei 1 Ohm auf; bei der Kurve c für $\frac{1}{2}$ Ohm und für die Kurve b bei $\frac{1}{4}$ Ohm, bei a dagegen erst für $w = 0$.

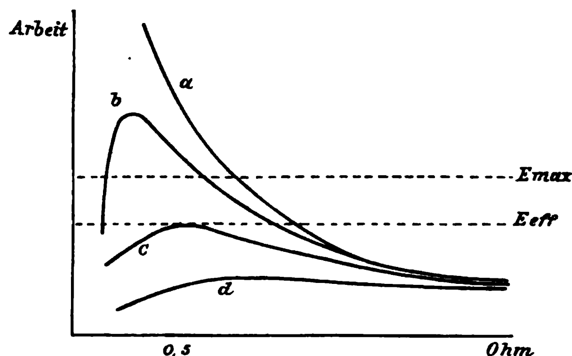


Fig. 260.

Eine grössere Auslese von Betriebskurven ist in Fig. 261 dargestellt. Die Abscissen sind entweder Erregerstrom oder Hauptstrom. Kurve 1 ist die Leerlaufcharakteristik: E in Abhängigkeit vom Erregerstrom J_n. Gleich darunter verläuft in gleicher Abhängigkeit eine Spannungskurve 2 für die belastete Maschine. Die Kurven 3, 4, 5 stellen die Spannung in Abhängig-

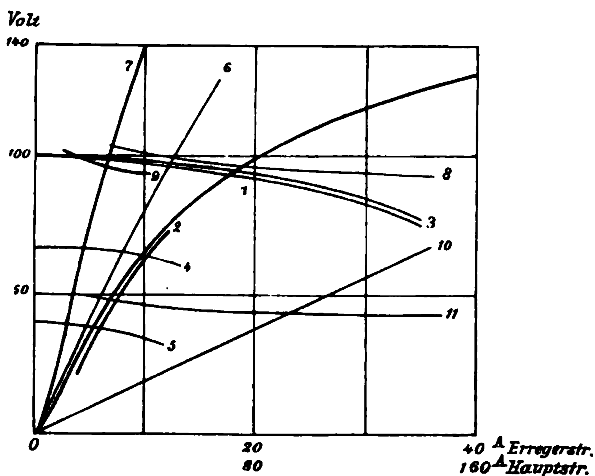


Fig. 261.

keit des äusseren Stromes dar und zwar für 20, 10 und 6 Amp. Erregerstrom. Kurve 6 entspricht der Leistung in Watt mit dem Hauptstrom als Abscissen. Kurve 7 findet sich als Stromstärke J_k bei kurzgeschlossener Maschine, sie steigt mit dem Erregerstrom fast geradlinig an. Der scheinbare Widerstand der Maschine, d. h.

$$\sqrt{(2\pi n L_i)^2 + W_i^2} = \frac{E}{J_k}$$

verläuft nach Kurve 8 und 9; erstere in Funktion des äusseren Stromes, letztere in Funktion des Erregerstromes. Die Reaktanz $2\pi n L J$ entspricht der Kurve 10 und der Selbstinduktionskoeffizient L der Kurve 11.

31. Periodenzahl (Frequenz).

§ 97. Übliche Periodenzahlen.

Die in Deutschland und überhaupt in Europa am meisten verwendete Periodenzahl ist 50 pro Sekunde, d. h. 100 Wechsel pro Sekunde oder 6000 Polwechsel pro Minute. Bei dieser Periodenzahl brennen Glühlampen und Bogenlampen, erstere auch für Innenräume ohne wahrnehmbares Flickern. Von Wechselstrombogenlampen kann dies allerdings kaum in vollem Masse gesagt werden. Glühlampen müssen, falls es sich nicht um sehr dicke Fäden handelt, mit mindestens 30 Perioden, Bogenlampen im Freien mit 50, im Innern, falls sie ganz befriedigend arbeiten sollen, mit 100 Perioden betrieben werden. Festliegend ist jedoch diese Frequenz von 50 Perioden keineswegs, was für die Grossfabrikation sehr hemmend wirkt, da die Normalien für jede Periodenzahl andere sind. In Amerika sind zwei Periodenzahlen, 60 und 125 bis 135, sehr verbreitet, erstere für Kraftübertragungszwecke und Motorenbetriebe, letztere für dichte Lichtnetze mit Einzeltransformatoren. In der Schweiz (Brown, Boveri & Co.) und auch sonst, z. B. bei Ganz & Co., sind 40 bis 45 Perioden sehr verbreitet. Die Niagaraübertragung benutzt die niedere Cykelzahl 25, da der induktive Leitungsabfall mit dem Quadrat der Periodenzahl abnimmt. Bei dieser geringen Cykelzahl ist aber für Beleuchtungszwecke eine Umformung nötig. Für Motorenantriebe hat sie jedoch den Vorteil, dass die Motoren schon bei geringer Polzahl kleine Tourenzahl haben.

§ 98. Einfluss hoher und niedriger Periodenzahl.

Bei gleicher minutlicher Tourenzahl werden Maschinen mit höherer Periodenzahl teurer als solche mit geringerer, da die Polzahl grösser wird; aber im allgemeinen fallen dieselben trotzdem kleiner aus, da die Maschinen mit höherer Periodenzahl gewöhnlich entsprechend rascher laufen. Der Wirkungsgrad von Transformatoren ist bei höherer Periodenzahl grösser und ihre Erwärmung geringer. Die Eisenverluste von Motoren werden ebenfalls mit steigender Periodenzahl und gleichbleibender effektiver Spannung kleiner. Der Ladestrom wird in Kabelnetzen mit steigender Frequenz grösser, was unter Umständen die Erwärmung der Kabel wesentlich vermehrt. Resonanzerscheinungen sind bei grosser Periodenzahl eher zu fürchten als bei niedriger. Die Oberflächenwirkung nimmt mit der Periodenzahl sehr rasch zu.

D. Magnetische Verhältnisse der Wechselstrommaschinen und die Felderregung.

32. Magnetischer Kreis der Wechselstrommaschine.

§ 99. Magnetisches Ohm'sches Gesetz. Die Berechnung der zur Erzeugung des Kraftlinienflusses K nötigen magnetomotorischen Kraft oder der Ampèrewindungen AW ist dieselbe wie bei Gleichstrom. Das OHM'sche Gesetz für Magnetismus lautet bekanntlich:

$$B \cdot q = K = \frac{1{,}26\, AW}{\Sigma \frac{1}{\mu} \frac{l}{q}} \quad \ldots \ldots \quad (46)$$

oder:

$$1{,}26\, AW = \frac{l_{Anker}}{\mu_{Anker}} B_{Anker} + \frac{l_{Zähne}}{\mu_{Zähne}} B_{Zähne} + l_{Luft} B_{Luft} + \frac{l_{Pol}}{\mu_{Pol}} B_{Pol} + \frac{l_{Joch}}{\mu_{Joch}} B_{Joch} \quad \ldots \ldots \quad (47)$$

AW sind die gesamten Ampèrewindungen eines Magnetkreises, q der Kraftlinienquerschnitt, l die magnetische Weglänge, μ die Permeabilität. Bei starken Sättigungen und stark variabler Permeabilität kann es angezeigt werden, für l nicht einfach eine mittlere Weglänge einzusetzen, sondern $\int dl$ über den ganzen Querschnitt zu bilden (siehe E. T. Z. 1899, F. NIETHAMMER, Die Kraftlinienverteilung in Nutenankern, und E. T. Z. 1898, Hysteresis und Wirbelströme).

Die Induktion an den verschiedenen Stellen findet sich aus den Querschnitten und aus den entsprechend gewählten Streuungskoeffizienten, worüber später noch ausführliche Erörterungen angestellt werden sollen. Für den Luftquerschnitt ist das Mittel aus Polrandquerschnitt und der Summe der Zahnkronen unter einem Pol mal 1,05 bis 1,15 zu setzen. Sind alle Pole bewickelt, so sind die berechneten Gesamtampèrewindungen pro Polpaar auf zwei Pole zu verteilen; bei einer grossen Erregerspule muss dieselbe unabhängig von der Polzahl die pro Polpaar bestimmte Ampèrewindungszahl erzeugen. Hat man die Erregerstromstärke aus wirtschaftlichen Gründen angenommen, so ist die Erregerwindungszahl pro Polpaar bestimmt und aus einer angenommenen Stromdichte oder gemäss einer bestimmten Erwärmung findet sich die Drahtstärke. Falls die Erregerspannung E_n pro Erregerspule

gegeben ist, wird der Drahtquerschnitt $q = \sigma \frac{AW \cdot l}{E_n}$, wobei σ der Widerstandskoeffizient und l die mittlere Windungslänge ist. Bei konstanter Erregerspannung und gegebenen Wicklungsverhältnissen ist die Ampèrewindungszahl unabhängig von der Windungszahl der Erregerspule.

Ermittelt man zu verschiedenen Kraftlinienzahlen K die zugehörigen AW, so kann man die früher besprochene Leerlaufcharakteristik (Fig. 246) aufzeichnen. Es ist dies eine Kurve, die sich mathematisch nur schwer fassen lässt; am ehesten lässt sie sich nach der FRÖLICH'schen Beziehung darstellen durch § 100. Aufzeichnung der Charakteristik.

$$K = \frac{AW}{a + b\,AW}, \qquad (47\text{a})$$

wobei a und b Konstante sind. In Fig. 262 ist eine thatsächliche Charakteristik mit der durch (47a) bestimmten (— —) nach R. BAUCH verglichen.

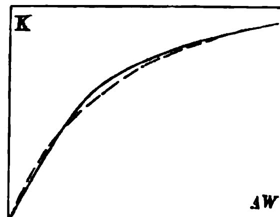


Fig. 262.

Der Luftquerschnitt bei Nutenankern ist, wie erwähnt, das Mittel aus dem Querschnitt am Polrand und demjenigen der Zahnköpfe unter dem Polbogen, wozu im allgemeinen 5 bis 10 Proc. für Abschattierung des Feldes geschlagen werden können.[1])

33. Theorie der Wechselstrommaschine nach Dr. Behn-Eschenburg.

Ganz allgemein auf Grund von Selbstinduktionskoeffizienten und Koeffizienten gegenseitiger Induktion hat Dr. BEHN-Eschenburg die Wechselstrommaschine behandelt: § 101. Grundbeziehungen der Theorie von Dr. Behn.

---

1) Für den Luftzwischenraum ist eigentlich bei Nutenankern ein etwas grösserer Wert als der radiale Abstand δ einzusetzen, da der mittlere Kraftlinienverlauf vom Polrand zur Nute etwas schräg ist, doch ist diese Vergrösserung nicht bedeutend. Hat ein Anker Eindrehungen von der Gesamtbreite a und Tiefe b zur Aufnahme von Bandagen, so ist der zu benutzende Luftabstand $\delta + \frac{a}{l} b$, wenn l die Ankerlänge ist. Die nützliche Streuung, d. h. die Kraftlinien, die ausserhalb der Polbogen noch eintreten, können immerhin 10 Proc. des Gesamtflusses ausmachen. Die genaue Ermittelung der magnetischen Weglängen l ist sehr schwierig, meist wäre eine Integration der einzelnen Kraftlinienröhren erforderlich. Schon für einen ringförmigen magnetischen Kreis mit dem inneren Umfang l_1 und dem äusseren l_2 und dem rechteckigem Querschnitt bh ist die mittlere magnetische Weglänge l nicht $\frac{l_1 + l_2}{2}$, sondern $\frac{l_1 - l_2}{log_n\, l_1 - log_n\, l_2}$; dabei ist die Veränderlichkeit der Permeabilität noch nicht berücksichtigt. In der Praxis werden die magnetischen Weglängen an Hand einer Maschinenskizze in der Regel geschätzt.

Setzt man[1]) J_n für den erregenden Gleichstrom (i_n für den variablen Wert), E_n für die erregende elektromotorische Kraft und bezeichnet man mit i und e die Momentanwerte des Ankerstroms und der induzierten elektromotorischen Kraft, mit j_1 und j_2 die in den Feldmagneten und im Anker erzeugten Wirbelströme und mit w_n, w, ϱ die verschiedenen Widerstände des Erregerkreises, des Hauptkreises und der Wirbelströme, mit l_n, l, l_ϱ die Selbstinduktionskoeffizienten und mit m_n, m, m_ϱ die Koeffizienten der gegenseitigen Induktion, so wird das Verhalten einer Wechselstrommaschine durch folgende vier Gleichungen ausgedrückt:

$$\left.\begin{aligned}
i w + \frac{\partial (l i)}{\partial t} + \frac{\partial (m_{\varrho_1} j_1)}{\partial t} + \frac{\partial (m_{\varrho_2} j_2)}{\partial t} &= \frac{\partial (m_n i_n)}{\partial t} + e \\
i_n w_n + \frac{\partial (l_n i_n)}{\partial t} + \frac{\partial (m'_{\varrho_1} j_1)}{\partial t} + \frac{\partial (m'_{\varrho_2} j_2)}{\partial t} + \frac{\partial (m_n i)}{\partial t} &= E_n \\
j_1 \varrho_1 + \frac{\partial (l_{\varrho_1} j_1)}{\partial t} + \frac{\partial (m''_{\varrho_2} j_2)}{\partial t} + \frac{\partial (m_{\varrho_1} i)}{\partial t} + \frac{\partial (m'_{\varrho_1} i_n)}{\partial t} &= o \\
j_2 \varrho_2 + \frac{\partial (l_{\varrho_2} j_2)}{\partial t} + \frac{\partial (m''_{\varrho_2} j_1)}{\partial t} + \frac{\partial (m_{\varrho_2} i)}{\partial t} + \frac{\partial (m'_{\varrho_2} i_n)}{\partial t} &= o
\end{aligned}\right\} \quad (48)$$

Die Wirkung der Ankerströme i auf die Wirbelströme j ist dabei nicht berücksichtigt. Dr. BEHN fasst dann die Wirkung der Wirbelströme mit dem OHM'schen Widerstand zu einem Gliede $i\,(w + n^2 f)$ zusammen, wobei n die sekundliche Periodenzahl und f eine Konstante ist, dann vernachlässigt er die Ankerrückwirkung auf den Erregerstrom i_n und vereinfacht die vier Gleichungen zu:

$$\left.\begin{aligned}
i\,(w + n^2 f) + \frac{\partial (l i)}{\partial t} &= \frac{\partial (m_n i_n)}{\partial t} + e \\
i_n w_n &= E_n \\
j_1 \varrho_1 + \frac{\partial (m_{\varrho_1} i)}{\partial t} &= o \\
j_2 \varrho_2 + \frac{\partial (m'_{\varrho_2} i_n)}{\partial t} &= o
\end{aligned}\right\} \quad . \; . \quad (49)$$

§ 102. Resultate der Theorie von Dr. Behn.

Unter Zugrundelegung der effektiven Weise wird nun ähnlich wie bei der Entwicklung unter Ausschluss der Induktionskoeffizienten die Charakteristik bestimmt:

$$E = \frac{i_n (m_n)_{max}}{\sqrt{2}} c_1 \cdot 2 \pi n \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (50)$$

(c_1 ist eine Konstante, die die Abweichung von der Sinusform angeben soll) und der Kurzschlussstrom J_k

$$J_k = \frac{E}{2 \pi n l \left(1 + \frac{(w + n^2 f)^2}{2 (2 \pi n l)^2}\right)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (51)$$

1) E. T. Z. 1895, S. 535.

Im gleichen Aufsatz wird im Anschluss an diese Entwicklungen die Dimensionierung der Wechselstrommaschinen ausführlich besprochen. Die Streuung wird durch einen Koefficienten σ berücksichtigt, der definiert ist durch

$$l\, l_n = (m_n)_{max}\,(1 + \sigma) \quad \text{. . . . . (52)}$$

34. Ankerrückwirkung und Streuung.

Auch ohne direkte Zuhilfenahme von höherer Mathematik lassen sich die eben besprochenen Verhältnisse behandeln. Die Spannung eines Wechselstromgenerators unter Belastung ist von der elektromotorischen Kraft bei gleicher Erregung nicht nur wegen des Ohm'schen Widerstandes, wegen der Eisenverluste und der Selbstinduktion der Wicklung verschieden, sondern auch wegen der Gegenwindungen, die die Ankerwicklung bei Belastung darstellt und überdies wegen der Streuung des Ankerfeldes und des primären Feldes. In einer Wechselstrommaschine hat man ebenso wie in einer Gleichstrommaschine im ganzen vier verschiedene Felder bezw. Ampèrewindungen zu unterscheiden. Die Erregerspulen erzeugen das Nutzfeld, das in den Anker eintritt und ein primäres Streufeld, das nicht in den Anker übertritt. Der Ankerstrom erzeugt ebenfalls ein Feld, das in die Erregerspulen übertritt und ein Streufeld, das nur mit dem Anker verschlungen ist. Das letztere ist das Ankerstreufeld, ersteres das Gegenfeld, erzeugt durch die Gegenampèrewindungen des Ankers. In Fig. 263 ist versucht, für die Ampèrewindungen einer Nute den Unterschied zwischen Gegenfeld und Streufeld klar zu machen. Der Anker ist von einem Ring umgeben gedacht. Die einfach schraffierten Flächen stellen die Grösse des Streufeldes dar, das um so grösser wird, je länger die Nute und je schmäler sie ist, je breiter und schmäler der Nutenschlitz und je weniger hoch er ist und schliesslich um so grösser je grösser der Luftzwischenraum ausfällt. Die doppelt schraffierten Flächen stellen das Gegenfeld dar. Beide Felder sind natürlich proportional den Ampèredrähten in der Nute und umgekehrt proportional je dem zugehörigen magnetischen Widerstand. Das Streufeld ist nichts anderes als das, was bereits mit Selbstinduktion bezeichnet wurde: § 103. Die verschiedenen Felder in einer Wechselstrommaschine.

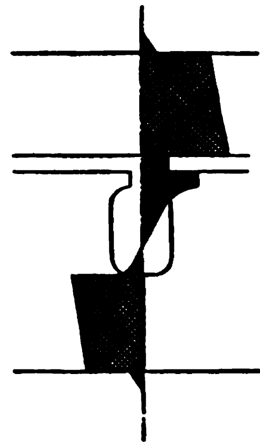


Fig. 263.

$$L\,J = z\,K'_s \quad \text{. . . . . (53)}$$

wobei K'_s das Streufeld ist.

Die Gegenampèrewindungen des Ankers lassen sich ganz ähnlich veranschaulichen wie bei Gleichstrom. Ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung Null, so eilt der Ankerstrom und damit das Ankerfeld ebenso wie die elektromotorische Kraft der Magnetisierung um 90° nach; die Ankerampèrewindungen bedingen dann im wesentlichen eine sogenannte Quermagnetisierung oder richtiger eine Verzerrung des Gesamtfeldes. Ist dagegen der Strom um 90° gegen die Spannung zurückgeschoben, so wirkt das Ankerfeld dem äusseren Feld direkt entgegen, bei 90° Voreilung wirkt § 104. Anker-Ampère-windungen.

es im selben Sinne wie das äussere Feld. Bei 0^0 Phasenverschiebung tritt gemäss Fig. 264, worin *a* das Feld bei Leerlauf, *b* die Ankermagnetisierung und *c* die resultierende Magnetisierung darstellt, der Fall ein, dass in einer Polspitze bei Belastung die Kraftliniendichte steigt, in der andern abnimmt.

§ 105. Einfaches Diagramm für den Spannungsabfall. In erster Annäherung lässt sich die Ankerrückwirkung samt Streuung bezw. Selbstinduktion in dem Diagramm für Bestimmung der Klemmenspannung (Fig. 232) dadurch berücksichtigen, dass man die Komponente des Spannungsabfalls, die senkrecht zur Stromstärke steht, so gross wählt, das sie nicht nur die Selbstinduktion, sondern auch die Gegenwindungen umfasst. Es ist dies namentlich damit zu begründen, dass sich durch Messung Streuung und Rückwirkung kaum trennen lassen und beide auch annähernd gleiche Richtung haben.

§ 106. Diagramm nach Kapp. Kapp trennt in dem Diagramm Fig. 265 Rückwirkung von der Streuung. Er setzt die Ankerrückwirkung proportional dem Sinus des Phasenwinkels zwischen Strom und Spannung, vernachlässigt also die Querkomponente des Ankerfeldes, die senkrecht zum Schenkelfeld steht. Die Grösse OE stellt die elektromotorische Kraft ohne Belastung dar. J ist der Stromvektor; $EC_1 = EC_2$

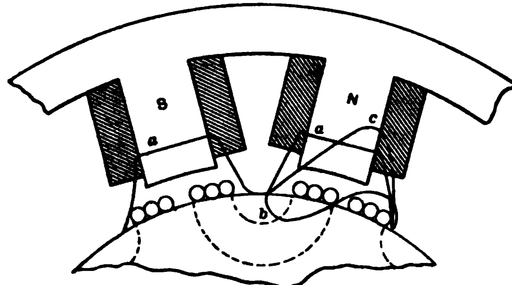


Fig. 264.

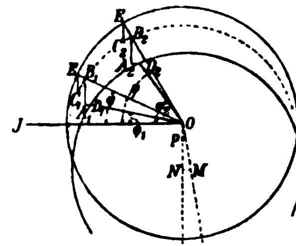


Fig. 265.

ist die durch die Ankerrückwirkung bedingte Spannungsverminderung für die Phasenverschiebung 90^0. Für die Phasenverschiebung φ ist sie nur die Projektion EB_1 bezw. EB_2. Um nun die eigentliche Klemmenspannung zu erhalten, ist von OB_1 und OB_2 der Spannungsabfall BA_1 bezw. BA_2 für Ankerstreuung und der Abfall A_1D_1 bezw. A_2D_2 für Kupfer- und Eisenverluste in Abzug zu bringen. OD_1 und OD_2 sind die Klemmenspannungen für dieselbe Stromstärke bei den zwei Phasenwinkeln φ_1 und φ_2. Das Schenkelstreufeld ist schon dadurch annähernd berücksichtigt, dass OE die elektromotorische Kraft ist, die durch das Nutzfeld, d. h. durch das Schenkelfeld abzüglich des primären Streufeldes induziert wird. Als geometrische Örter für die Punkte E findet sich ein Kreis aus O, für die Punkte B ein Kreis aus P ($OP = EC_1 = EC_2$), für die Punkte D ein Kreis aus M ($PN = A_1B_1 = A_2B_2$ und $NM = A_1D_1 = A_2D_2$). Der Abfall wird mit zunehmender Phasenverschiebung immer grösser.

§ 107. Genaues Diagramm einer Wechselstrommaschine. Den Thatsachen am meisten entspricht das Diagramm Fig. 266: K_a sei das im Anker auftretende Nutzfeld; senkrecht dazu steht die elektromotorische Kraft E; der äussere Strom verläuft entsprechend der Netzbelastung in der Richtung J. Der Ohm'sche Abfall hat dieselbe Richtung wie der Strom. Zieht man diesen Abfall im Diagramm von E ab, so findet sich die Klemmenspannung E_k. Der Winkel φ ist durch die Art der Netzbelastung bedingt.

Die Ankerampèrewindungen AW_a sind proportional und phasengleich dem Ankerstrom. Die Streulinien des Ankers verlaufen parallel zu den sie erzeugenden Ankerampèrewindungen AW_a und sind ihnen proportional. Schlägt man dieselben zu K_a, so erhält man das resultierende Feld K_r, das z. B. im Luftspalt herrscht. Phasengleich mit K_r sind die resultierenden Ampèrewindungen AW_r. Aus AW_r und AW_a ergeben sich die primär aufzuwendenden Schenkelampèrewindungen AW_f. Parallel und angenähert proportional zu AW_f sind die primären Streulinien, die Streulinien des Schenkelfeldes. Fügt man dieselben zu K_r, so ergiebt sich das gesamte Schenkelfeld K_f. Aus der Fig. 266 ist ersichtlich, dass die Ankerrückwirkung bei $\varphi = 0$ nicht Null ist; sie übt dann nur eine verzerrende Wirkung aus. Der Winkel φ spielt bei der Ankerrückwirkung von Drehstrommaschinen eine ähnliche Rolle wie der Bürstenvorschub bei Gleichstrommaschinen. Blondel berücksichtigt die Querkomponente dadurch, dass er die Ankerrückwirkung durch zwei Koeffizienten ausdrückt, die der Wattkomponente (Quermagnetisierung) und der wattlosen Ankerstromkomponente (Längsmagnetisierung) entsprechen. (Z. f. Elektrot. Wien 1899).

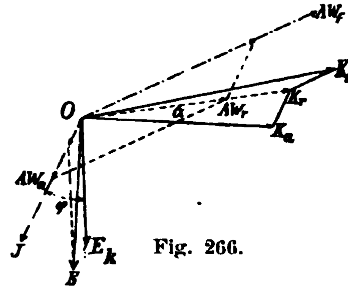


Fig. 266.

Bei Berechnung der Ampèrewindungen sind für die einzelnen Teile der Maschine die in Fig. 266 angedeuteten Kraftlinienzahlen einzusetzen.

35. Kurzschlussstrom.

Die Grösse der Ankerrückwirkung und der Ankerstreuung, welch letztere gegenüber der ersteren meist klein ausfällt und häufig einfach als Korrektionsglied zu den Gegenwindungen geschlagen wird, lässt sich aus den beiden § 108. Kurzschluss-charakteristik.

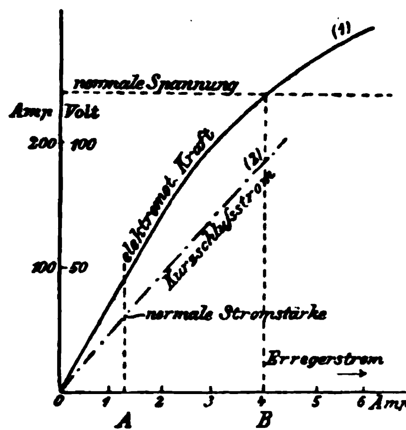


Fig. 267.

Kurven Fig. 267 finden: Kurve (1) ist die bekannte Maschinencharakteristik für Leerlauf und Kurve (2) stellt den Strom bei Kurzschluss der Maschine in Abhängigkeit der Erregung dar, wobei die Ankerampèrewindungen die Feldampèrewindungen soweit aufheben, dass nur die elektromotorische Kraft

der Streuung und höchstens noch die OHM'schen Verluste in der Maschine aber keine Nutzspannung überwunden wird. In erster Annäherung lässt sich das Diagramm Fig. 232 aus der Kurve des Kurzschlussstroms ermitteln. Man macht E z. B. gleich der Ordinate der Charakteristik über dem Erregerstrom B. Die Richtung und Grösse des Hauptstromes J muss bekannt sein. $E_s = 2\pi n L J$ wird aus der Charakteristik genommen und zwar bei einer Erregung A, wobei die Kurzschlussstromkurve die angenommene Stromstärke J zeigt. E_w ist gleich dem Abfall $JW + \frac{A_H}{E}$ durch Kupfer- und Eisenverluste. Damit ist die Klemmenspannung E_k bestimmt.

§ 109. Spannungsabfall aus dem Kurzschlussstrom. An Hand dieses Verfahrens lässt sich nach ÖLSCHLÄGER unter Vernachlässigung des meist kleinen Abfalls E_w fogende Beziehung anschreiben

$$1 = \left(\frac{E_k}{E}\right)^2 + 2\left(\frac{E_k}{E}\right)^2\left(\frac{J}{J_k}\right)\sin\varphi + \left(\frac{J}{J_k}\right)^2 \quad . \; . \; . \quad (54)$$

indem man setzt:

$$\frac{E}{E_s} = \frac{2\pi n L J_k}{2\pi n L J} = \frac{J_k}{J}.$$

Für verschiedene Phasenwinkel φ erhält man nach dieser Gleichung eine Kurvenschar (Fig. 268), welche die früher erörterte äussere Charakteristik

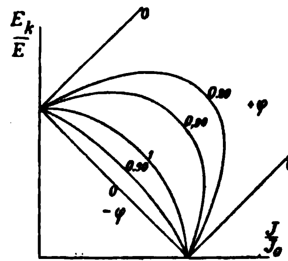


Fig. 268.

darstellt. Diese Kurvenschar gilt bei einer bestimmten Stromstärke $J_0 = J_k$ und einer bestimmten Erregung für verschiedene Phasenwinkel. Die oben liegenden Kurven resultieren bei einer Phasenvoreilung, die angeschriebenen Zahlen bedeuten den Leistungsfaktor cos φ.

Während beim Arbeiten auf ein induktives Netz die Klemmenspannung mit zunehmender Belastung immer abnimmt, steigt dieselbe bei Belastung mit Kapazität zunächst erheblich an.

Ist statt des Wertes J_k der Wert des induktiven Abfalls E_s bekannt, so kann die Gleichung für die Klemmenspannung oder den Spannungsabfall auch geschrieben werden:

$$1 - \frac{E_k}{E} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{E_s}{E}\right)^2 \cos^2\varphi} + \frac{E_s}{E}\sin\varphi \quad . \; . \quad (54\,\mathrm{a})$$

§ 110. Verwendung von J_k für das genaue Diagramm. Die besprochene Benützung des Kurzschlussstromes ist nur berechtigt, solange das in Betracht kommende Stück der Maschinencharakteristik geradlinig verläuft. Unabhängig von der Gestalt der Charakteristik wird man dadurch, das man nicht mit elektromotorischen Kräften oder Feldern, sondern mit Ampèrewindungen bezw. magnetomotorischen Kräften operiert. Man rechnet

aus dem Kurzschlussstrom die Ankerampèrewindungen AW'_a aus — es ist dies das Produkt aus dem Erregerstrom oA (Fig. 267) und den Erregerwindungen — und geht damit in das Diagramm Fig. 266 ein. Lässt man dort zunächst K_r mit K_a zusammenfallen, so findet sich das Dreieck $0\,AW_a\,AW'_r$ aus AW'_a, AW_f und dem Winkel $90^0 + \varphi$ zwischen AW'_a und AW_r. AW_f sind die eben eingestellten Feldampèrewindungen. Aus der Maschinencharakteristik entnimmt man nunmehr die zu AW'_r gehörige Kraftlinienzahl oder die zugehörige elektromotorische Kraft, die nur noch um den Arbeitsabfall durch Kupfer- und Eisenverluste im Diagramm zu vermindern ist, um die Klemmenspannung zu finden. Damit ist der Krümmung der Charakteristik Rechnung getragen. Bei starkgesättigten Maschinen ist der Unterschied der beiden Methoden bedeutend und zwar ist der nach der zweiten Methode bestimmte Abfall günstigerweise unter Umständen wesentlich kleiner als nach erster Methode. Starkgesättigte Maschinen haben also bei gleicher Ankerampèrewindungszahl geringeren Spannungsabfall als schwachgesättigte. Der Spannungsabfall bei Belastung gegenüber Leerlauf wird häufig noch dadurch vergrössert, dass die Antriebstourenzahl nachlässt. Bei direkter Kupplung der Erregermaschine sinkt dann auch noch der Erregerstrom. Für solche Fälle ist es empfehlenswert, den Generator und die Erregermaschine möglichst stark zu sättigen, um den Einfluss der Tourenschwankungen zu mildern.

36. Maximum der Leistung.

Die Klemmenspannung einer Maschine lässt sich bei einer bestimmten Phasenverschiebung ausdrücken durch (s. Gleichung 54a) § 111. Maximale Arbeit und Wirkungsgrad in J_k ausgedrückt.

$$E_k = \sqrt{E^2 - E_s^2 \cos^2 \varphi} - E_s \sin \varphi.$$

Damit ergiebt sich eine scheinbare Leistung der Maschine von

$$J\sqrt{E^2 - E_s^2 \cos^2 \varphi} - JE_s \sin \varphi.$$

Aus dieser Beziehung lässt sich nach FISCHER-HINNEN E. T. Z. 1895 auf etwas andere Weise als früher die maximale Leistung eines gegebenen Generators bestimmen. Man findet dabei als Bedingung für das Maximum eine Stromstärke:

$$\frac{E}{\sqrt{2}\,W_s}\,\frac{1}{\sqrt{\sin \varphi + 1}}, \quad \ldots \ldots \ldots (55)$$

worin W_s bedeutet:

$$W_s = \frac{E}{J_k} = \frac{E_s}{J} = \sqrt{w^2 + 4\,\pi^2 n^2 L^2}$$

(J_k ist der Kurzschlussstrom bei der Erregung, die leer die Spannung E giebt.) Der Wirkungsgrad, der hierzu gehört, ist:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{2}\,\sqrt{\sin \varphi + 1}}. \quad \ldots \ldots \ldots (56)$$

Die maximale scheinbare Arbeit in Voltampère ist

$$\frac{E^2}{W_s}\,\frac{1}{2\,(\sin \varphi + 1)} = EJ_k\,\frac{1}{2\,(\sin \varphi + 1)}. \quad \ldots \ldots (57)$$

37. Gegenampèrewindungen.

§ 112. Einfache Näherungsformeln für die Anker-AW.

Für die Berechnung der Gegenwindungen des Ankers haben sich in der Praxis verschiedene Näherungsverfahren herausgebildet. Kapp hat seinerzeit angegeben, dass bei einer einphasigen Wechselstrommaschine mit ebensoviel Spulen wie Polen zu jedem Pol der Feldwicklung ein Betrag hinzuzufügen ist von der Grösse:

$$0{,}0156\, z J \varphi, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (58)$$

wobei z die Windungszahl einer induzierten Spule (Leiterzahl pro Spulenseite), J der effektive Ankerstrom und φ der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung in Graden ist. Der Ausdruck ist positiv oder negativ, je nachdem es sich um Phasenvoreilung oder um Phasennacheilung handelt. Die Beziehung ist dadurch entstanden, dass für die periodisch schwankenden Ampèrewindungen einfach ein Mittelwert gesetzt worden ist. Eine ganz ähnliche Formel von Kapp besagt, dass die Ankergegenwindungen in Bezug auf die Feldwicklung äquivalent sind

$$2{,}22\, z J \sin \varphi. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (59)$$

§ 113. Anker-AW der Mehrphasenmaschinen.

Bei Mehrphasenströmen gestaltet sich die Ermittlung der Ankerampèrewindungen etwas einfacher. Es setzen sich bekanntlich die einzelnen Wechselfelder zu einem resultierenden Drehfeld zusammen, das wenigstens annähernd seine Stärke dauernd beibehält. Das gleiche gilt für die zugehörigen Ampèrewindungen. D. Korda hat E. T. Z. 1895 auch mit Hilfe der Koeffizienten M_1, M_2 der gegenseitigen Induktion für die Zweiphasenwicklung gegenüber der Feldwicklung bewiesen, dass diese Rückwirkung konstant und nicht ondulierend ist, da

$$\frac{d\,(M_1\, i_1 + M_2\, i_2)}{d\,t} = 0.$$

Ist J der effektive Strom einer Phase und z die Windungszahl pro Phase für eine Dreiphasenmaschine, so ist die maximale Ampèrewindungszahl pro Phase und Pol

$$\frac{J z}{2 p} \sqrt{2}$$

und somit die resultierende Ampèrewindungszahl aller drei Phasen von dem konstanten Betrag

$$A W_a = 1{,}5 \sqrt{2}\, \frac{J z}{2 p} = 2{,}12\, \frac{J z}{2 p}. \quad \ldots \ldots \quad (60)$$

Würde man statt des Koeffizienten 1,5 z. B. das Mittel aus den früher angegebenen Werten 2 und $\sqrt{3}$ einsetzen, so käme man zu dem Ausdruck

$$A W_a = 1{,}86 \sqrt{2}\, \frac{J z}{2 p} = 2{,}62\, \frac{J z}{2 p}. \quad \ldots \ldots \quad (61)$$

Für Zweiphasenmaschinen gilt:

$$A W_a = \frac{\sqrt{2}\, J z}{2 p},$$

wenn z pro Phase gerechnet wird.

Thatsächlich hängt jedoch dieser Koeffizient von der Maschinentype ab; er wird gewöhnlich ein- für allemal bestimmt und zwar wird er gleich so gross gewählt, dass er die Wirkung der Streuung mit berücksichtigt. Falls man schreibt:

$$AW_a = 2{,}12\ C \frac{Jz}{2p},$$

so ist C nichts anderes als das Verhältnis der Feldampèrewindungen AW_k, die nötig sind, um einen Kurzschlussstrom von der Grösse des in Betracht zu ziehenden Belastungsankerstroms J zu erzeugen, zu AW_a der Gl. 60. Die Grösse C schwankt im allgemeinen zwischen 0,90 und 1,60. Der kleinere Wert gilt für Maschinen mit geringer Streuung und verteilter Wicklung. Die Grösse AW_k bezw. die ganze Kurzschlusskurve ist in weiten Grenzen von der Umdrehungszahl und vom Luftraum unabhängig, da sich bei gegebenen Wickelverhältnissen in der kurz geschlossenen Maschine, abgesehen von dem OHM'schen Abfall und der Streuspannung einfach Ankerampèrewindungen und Feldampèrewindungen gegenseitig aufheben ohne Rücksicht auf Geschwindigkeit oder magnetischen Widerstand.

§ 114. Anker-AW für Einphasenmaschinen.

Für Einphasenmaschinen giebt ROTHERT an, dass für die Gegenwindungen folgender Ausdruck in Rechnung zu setzen ist, falls man die Einphasenmaschine auffasst als Dreiphasenmaschine in Sternschaltung, bei der eine Phase weggelassen wird:

$$AW_a = \frac{Jz}{2p} \sqrt{2} \sqrt{3} \cdot \frac{2}{\pi} = 1{,}56 \frac{Jz}{2p}. \quad \ldots \quad (62)$$

Hat man nur eine der drei Phasen in Benutzung, so ist

$$AW_a = \frac{Jz}{2p} \sqrt{2} \cdot \frac{2}{\pi} = 0{,}9 \frac{Jz}{2p} \quad \ldots \ldots \quad (63)$$

z ist immer die Windungszahl einer Phase.

Der Faktor $\frac{2}{\pi}$ rührt daher, dass bei Wechselstrommaschinen die Ankerampèrewindungen periodisch verlaufen und in die Formel ihr einfacher Mittelwert eingesetzt ist.

§ 115. Erfahrungskoeffizient für die Anker-AW.

Für das Verhältnis $C = AW_k$ zu AW_a, d. h. das Verhältnis der Schenkel-AW zur Erzeugung eines Kurzschlussstromes gleich dem normalen zu den nach Formel 58, 60 und 61 berechneten AW_a ergaben Versuche von ROTHERT:

1. Eine vierpolige Aussenpoldrehstrommaschine von 5 KW, $\frac{P}{\tau} = \frac{2}{3}$, mit 12 offenen Nuten pro Pol (reine Drehstromwicklung), die Leerlaufcharakteristik ist geradlinig: $C = 1{,}19$.

2. Zehnpolige 47 KW-Maschine mit zwei halbgeschlossenen Nuten pro Pol und Phase, Drehstromwicklung mit langen Spulen: $C = 1{,}5$.

Versuche des Verfassers an Innenpolmaschinen von Leistungen bis 200 KW mit zwei Nuten pro Pol und Phase und geschlossenen oder ganz wenig geschlitzten, möglichst runden Nuten ergaben für Ein- und Dreiphasenstrom Koeffizienten von der Grösse 1,25 bis 1,35. Eine Drehstrommaschine, die aus bestimmten Gründen mit einer gewöhnlichen Gleichstromwicklung versehen wurde, ergab den sehr niedrigen Wert $C = 0{,}95$. Die im Dreieck geschaltete Wicklung besitzt 18 offene Nuten pro Pol, $P : \tau$ ist etwa 0,6.

§ 116. Erregerstrom bei variabler Belastung.

Zur Bestimmung der Erregerstromstärke bei variablem Strom und variabler Phasenverschiebung lässt sich das Diagramm Fig. 269 benutzen. AW_r sind die Ampèrewindungen zur Erzeugung der Klemmenspannung bei Leerlauf, die Viertelskreise sind mit verschiedenen Werten von AW_a beschrieben, die den gewünschten Ankerströmen entsprechen. AW_f sind jeweils die benötigten Feld-AW bei Belastung, aus denen sich der Erregerstrom durch Division mit der Erregerwindungzahl pro Pol ergiebt. Die Strahlen AW_f entsprechen allgemein den zu einer bestimmten Belastung und Phasenverschiebung gehörigen Erreger-Ampèrewindungen.

Will man die einem bestimmten Ankerstrom bei gegebener Phasenverschiebung entsprechende Spannung bei einer gewissen Felderregung finden, so kann dies an Hand der Fig. 270 geschehen: Es ist die Charakteristik A ohne Rücksicht auf Feldstreuung, B mit Rücksicht auf Feldstreuung gezeichnet. $AW_a = OH$ ist unter dem $\sphericalangle\ \varphi$ an die Vertikale gelegt und um H ein Kreis mit dem eingestellten Erreger-AW = AW_f geschlagen, wodurch x bestimmt ist. $OC = AW_f$. In x und C werden Lote errichtet, welche die beiden Kurven in G, F und E treffen. Ziehe

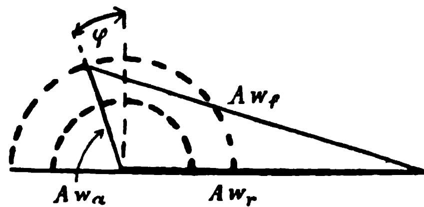


Fig. 269.

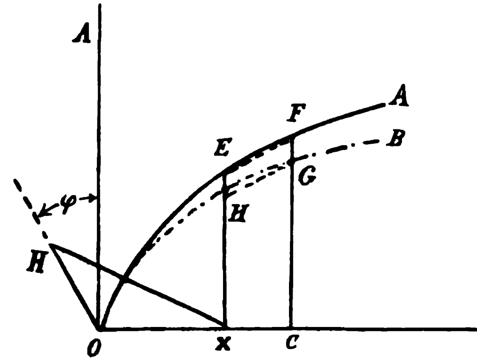


Fig. 270.

$GH \parallel EF$, dann ist xH die gesuchte Spannung unter Berücksichtigung der Ankerrückwirkung, der Feldstreuung und der Ankerstreuung (letztere ist in AW_a enthalten).

§ 117. Anker-AW nach Kapp.

Kapp hat neuerdings (Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom, 3. Auflage) für die Gegenampèrewindungen des Ankers unter Vernachlässigung der verzerrenden (quermagnetisierenden) Wirkung folgende Ausdrücke ermittelt, die das Verhältnis der Polbreite P zur Teilung τ berücksichtigen, und zwar für Maschinen der Wechselpol- und Gleichpoltype:

$$\left.\begin{aligned}
&\text{für Einphasenwicklungen} && AW_a = \frac{Z}{4p}\,\frac{0{,}57}{m}\,\sin m\,\frac{\pi}{2} \times \sin\varphi.\\
&\text{„ Zweiphasenwicklungen} && AW_a = \frac{Z}{4p}\,\frac{1{,}13}{m}\,\sin m\,\frac{\pi}{2} \times \sin\varphi.\\
&\text{„ Dreiphasenanker} && AW_a = \frac{Z}{4p}\,\frac{1{,}68}{m}\,\sin m\,\frac{\pi}{2} \times \sin\varphi.
\end{aligned}\right\}\quad (64)$$

AW_a gilt pro Pol, Z ist die Leiterzahl pro Phase, $m = P : \tau$, φ die Phasenverschiebung.

Bei Gleichpolmaschinen mit nur einem Anker ist nur der halbe Wert einzusetzen.

Für p'-Phasen gilt nach KAPP allgemein

$$A W_a = \frac{Z}{4p} \frac{0{,}57\, p'}{m} \sin m \frac{\pi}{2} \cdot \sin \varphi.$$

KAPP berücksichtigt in diesen Formeln die Polbreite, indem er einmal das Ankerfeld berechnet, wenn der in Betracht gezogene Ankerleiter die Polbreite durchläuft und dann, wenn derselbe die Pollücke durchläuft. Beide Ausdrücke werden getrennt integriert. Bei Mehrphasenwicklungen ist bei einer Phasenverschiebung von 90° von den konstanten Ankerampèrewindungen, die sich im Raume mit konstanter Winkelgeschwindigkeit drehen und sich deshalb räumlich nach Fig. 271 als sinusartige Kurve darstellen lassen, nur

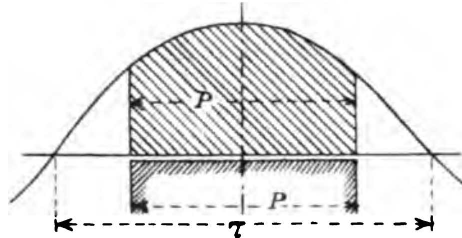


Fig. 271.

der Teil als wirksam betrachtet, welcher den Polen gegenübersteht (siehe die schraffierte Fläche). Bei einer Verschiebung kleiner als 90° ist die wirksame Ampèrewindungszahl, die dem Pol gegenüberliegt, durch ein anderes Flächenstück dargestellt, das gegen ersteres verschoben ist. Als Maximum nimmt KAPP bei Dreiphasenwicklungen den früher angegebenen Ausdruck

$$1{,}86 \sqrt{2} \frac{J z}{2 p}.$$

Diese Ausdrücke (Gleichung 64) geben häufig zu niedrige Werte, wenn auch eine einwandsfreie Kontrolle schwierig ist, da sich eine genaue Trennung von Streuung und Gegenwindungen schwer ausführen lässt. Ich fand statt 1,68 öfters etwa 2,00, wobei die Ankerstreuung nach späterem rechnerisch getrennt wurde. Von Gleichstrommaschinen her ist es übrigens auch bekannt, dass die Gegenwindungen des Ankers nicht ohne weiteres abhängig sind von dem Verhältnis Polbreite : Teilung, nur auf die Quermagnetisierung ist das Verhältnis von Einfluss, den Abfall beeinflusst es nicht. Jedenfalls ist es nur für Näherungsrechnungen zulässig, die Anker-AW dem $\sin \varphi$ proportional zu setzen und die Querkomponente zu vernachlässigen.

Bei Wicklungen mit grosser Zahl von Nuten pro Pol und Phase lassen sich zur Berechnung der Ankerampèrewindungen mit Vorteil die von KAPP entwickelten Koeffizienten des Ausdrucks

$$A W_a' = x' \frac{Z J}{4 p}$$

verwenden (Dynamomaschinen S. 431), wonach x' für Dreiphasenspulen mit einer Spulenbreite $s = \frac{\tau}{3}$ den Wert 1,29 hat, für Zweiphasenspulen, falls $s = \frac{\tau}{2}$, ist $x' = 0{,}81$ und für Dreiphasen schleichend, wobei $s = \frac{2}{3} \tau$ ist,

$x = 1{,}11$. Durch Versuche findet man statt des ersten Wertes Schwankungen von 1,29 bis 1,75.

§ 118. Ankerrückwirkung durch Wirbelströme.

Die Ankerrückwirkung wird noch vergrössert durch die Wirbelströme in dem Ankereisen und den Polschuhen. Der Phasenwinkel dieser Gegenwindungen hängt von dem Verhältnis der Selbstinduktion zum Widerstand der betreffenden Eisenteile ab (siehe F. NIETHAMMER E. T. Z. 1899, S. 768).

§ 119. Üblicher induktiver Abfall.

Die Ankerrückwirkung und der dadurch bedingte Spannungsabfall lässt sich dadurch verringern, dass man die Ankerleiterzahl beschränkt und die Induktion hochhält, d. h. der Maschine wenig Ankerkupfer, reichlich Ankereisen und viel Erregerkupfer giebt. Maschinen mit geringer Ankerrückwirkung sind teurer als solche mit grosser. Es ist gegenwärtig üblich, Drehstrom- und Wechselstrommaschinen so zu bauen, dass die rückwirkenden Ampèrewindungen bei Volllast und 90° Phasenverschiebung etwa $^1/_3$ oder $^1/_4$ der Gesamtampèrewindungen ausmachen. Es stellt sich dann ein Kurzschluss-

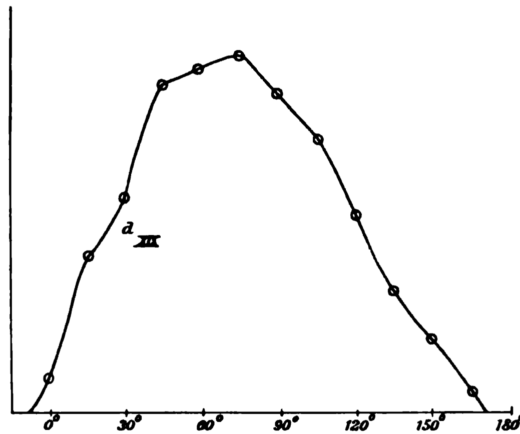


Fig. 272.

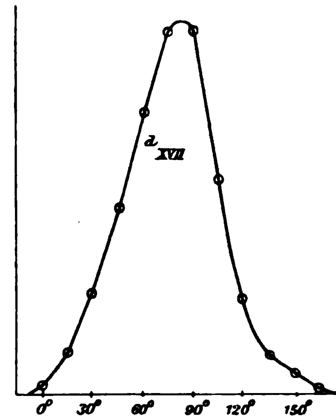


Fig. 273.

strom gleich dem normalen Belastungsstrom bei einem Erregerstrom ein, der kleiner als $^1/_3$ bis $^1/_4$ des Erregerstroms bei normaler Belastung ist. Solche Maschinen haben bei induktionsfreier Belastung 5 bis 10 Proc. Spannungsabfall von Leerlauf auf Volllast; bei induktiver Belastung mit Motoren etwa 15 bis 30 Proc. Man sollte allerdings bestrebt sein, bei Kraftbetrieben die Ankerrückwirkung, auf gleiches $\cos \varphi$ bezogen, höchstens halb so gross werden zu lassen, als bei Lichtbetrieb.

§ 120. Verzerrung der Kurven durch die Ankerrückwirkung.

Die Form der Ankerrückwirkung ihrem zeitlichen Verlaufe nach hängt von der Belastung ab; sie bedingt eine Verzerrung der Spannungskurve. In ausgesprochenem Maasse ist diese Deformation der Spannungskurve aus den beiden Figuren 272 u. 273 zu ersehen. Die Maschine arbeitete mit der Spannungskurve Fig. 272 auf einen eisengeschlossenen Transformator mit $B = 2300$; sie ist flach und eckig, der Formfaktor 1,15. Die nächste Kurve (Fig. 273) entsteht, wenn die Induktion im Transformator 13 300 ist; der Formfaktor ist auf 1,33 gestiegen.

Die Deformation der Spannungskurve durch die Belastung wurde in interessanter Weise bei der Telluride-Anlage in Amerika[1]) beobachtet, wo

1) E. T. Z. 1899, S. 156.

bekanntlich Spannungen bis 133,000 Volt erzeugt wurden. Die Spannungskurve 1 (Fig. 274) gilt für Leerlauf, Kurve 2 für Belastung mit einem einzelnen Stromkreise, Kurve 3 für Belastung mit zwei parallel geschalteten Stromkreisen, je bei gleichem Effektivwert.

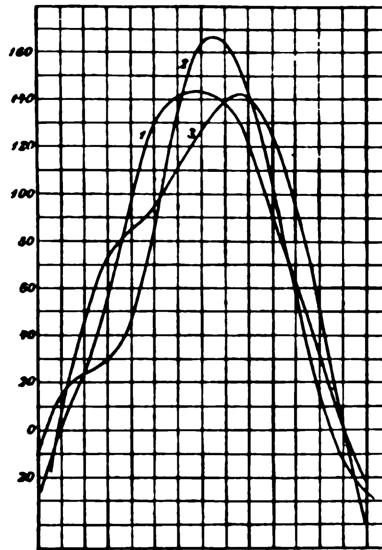


Fig. 274.

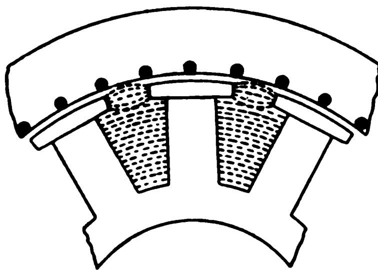
§ 121. Dämpfer von Leblanc.

LEBLANC hat zur Verringerung der Ankerrückwirkung von Einphasenmaschinen in den Polschuhen sogenannte Dämpfer oder Amortiseurs angebracht, auf die bei der Parallelschaltung von Maschinen noch weiter eingegangen wird. Es sind dies Stäbe, die die Polschuhe in der Achsrichtung durchsetzen und vorn und hinten kurzgeschlossen sind. Die Wirkung des Dämpfers kann man sich dadurch verständlich machen, dass man das Ankerfeld als zwei Drehfelder auffasst, die in entgegengesetzter Richtung rotieren. Das Feld, das mit der Maschine rotiert, kann einfach durch stärkere Felderregung neutralisiert werden; das andere, im entgegengesetzten Sinne rotierende erzeugt in dem Dämpfer Ströme, welche das erstgenannte Drehfeld aufzuheben suchen.

38. Feldstreuung.

§ 122. Primärer Streufluss aus dem Ohm'schen Gesetz berechnet.

Die primäre Streuung, bezw. die Streuung der Feldmagnete, die durch Fig. 275 zum Ausdruck gebracht ist, lässt sich am einfachsten nach dem


Fig. 275.

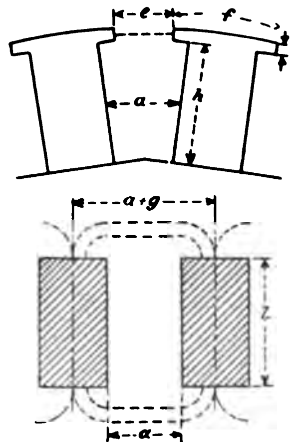


Fig. 276.

magnetischen OHM'schen Gesetz berechnen. Für die Innenpolmaschine[1]) Fig. 276 berechnet sich der Streufluss pro Pol aus vier Summanden. Die

1) KAPP, Die Dynamomaschine S. 180.

Streukraftlinien, die beiderseits von Polschuhkante zu Polschuhkante übergehen, sind gleich (AW gilt pro Pol und zwar nur für den Luftspalt und den Anker)

$$2 \times \frac{4\pi}{10} AW \frac{lb}{e/2} = 5{,}04\, AW \frac{lb}{e} \quad \ldots \ldots \quad (65)$$

Die Streulinien, die von der Stirnseite der Polschuhe übertreten, finden sich angenähert zu

$$4 \times \frac{4\pi}{10} AW \frac{bf/2}{\pi \frac{f}{4} + e/2} = 5{,}04\, AW' \frac{bf}{\pi f/2 + e} \quad \ldots \qquad (65\,a)$$

oder genauer durch Integration der einzelnen Kraftlinienwege

$$7{,}4\, AW \cdot b \log\left(1 + \frac{\pi}{2}\frac{f}{e}\right) \quad \ldots \ldots \ldots$$

Längs der Kanten der rechteckigen Magnete treten über

$$2{,}52\, AW' \frac{lh}{a},$$

wobei angenommen ist, dass die Ampèrewindungen vom Fuss des Magneten bis oben von 0 bis AW stetig zunehmen. Von den Stirnseiten der Magnete treten

$$2{,}52\, AW \frac{hg/2}{\pi g/4 + a/2} = 2{,}52\, AW' \frac{hg}{\pi g/2 + a} \quad \ldots \qquad (65\,b)$$

oder genauer

$$3{,}7\, AW \cdot h \log\left(1 + \frac{\pi}{2}\frac{g}{a}\right) \quad \ldots \ldots \ldots$$

Streulinien aus.

Bei Polen, deren Querschnitt aus einem Rechteck und zwei angesetzten Halbkreisen besteht, sind die Streulinien längs der Magnetkanten und Stirnseiten des Magnetpols

$$2{,}5\, AW \frac{hl}{a} + 2\, AW' \frac{g}{0{,}39\,(g+a) + 0{,}11\,a},$$

wenn l der gerade Teil des Magnetquerschnittes ist; die übrigen Maasse wie oben.

Einfach lässt sich auch angenähert für die Streulinien insgesamt setzen:

$$2{,}52\, AW \frac{lh}{a},$$

in dem man für h die ganze radiale Magnethöhe und für a einen mittleren Abstand der Magnetkanten setzt.

§ 123. Nährungsformel für den Streufluss.

Ganz allgemein kann man für die Streulinien pro Pol setzen:

$$K_s = \frac{AW'}{\varrho}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (66)$$

wobei AW' die Ampèrewindungen sind für Anker und Luftraum. Für ϱ kann man bei gegebener Maschinentype setzen:[1])

$$\varrho = \frac{k\sqrt{p}}{\sqrt{ld}}, \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (67)$$

1) Kapp, Die Dynamomaschine S. 178. Das Sicherste ist indes stets, die Streulinien direkt aus dem magnetischen Widerstand und den AW' zu berechnen.

worin l, d Länge und Durchmesser in Centimeter und p die Polpaarzahl ist. Für Aussenpolmaschinen liegt der Koeffizient k erfahrungsgemäss zwischen 0,35 und 0,55.

Für die Dreiphasenmaschine Fig. 279 ist der Kraftlinienfluss im Rücken des Magnetgestelles 1,27, Mitte Pol 1,18, am Polschuh 1,05, wenn er im Anker 1,00 ist. § 124. Beispiele für primäre Streukoeffizienten.

Ein achtpoliger Fort-Wayne-Alternator mit $P:\tau = 2:3$ (Aussenpole) zeigte folgende Kraftlinienverhältnisse:

Joch	98 Proc.
Jochende der Spule . .	100 „
Mitte „ „ . . .	97 „
Polende „ „ . . .	85 „
Anker	72 „

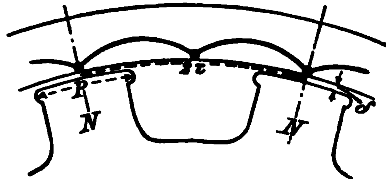


Fig. 277.

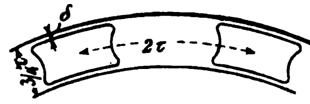


Fig. 278.

Für Gleichpolmaschinen giebt Kapp für den Wert $k = \frac{K_s}{K}$, dem Verhältnis des Streuflusses K_s zu dem Gesamtkraftlinienfluss K für die in Fig. 277 skizzierte Type § 125. Feldstreuung der Gleichpoltype.

$$k = 1{,}7\,\frac{\delta}{\tau}\log_{nat}\frac{\tau}{2\,\delta}$$

und für die Skizze Fig. 278

$$k = 530\,\frac{\delta}{\tau}.$$

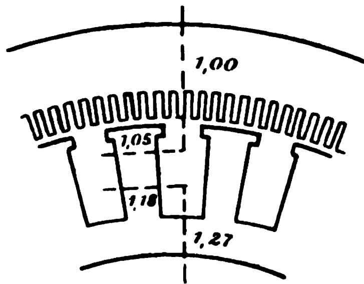


Fig. 279.

Die Feldstreuung von Maschinen der Gleichpoltype, die in der Umgebung von grossen Eisenmassen aufgestellt, z. B. mit Dampfmaschinen direkt gekuppelt sind, kann verhängnisvoll gross sein. In der Maschine Fig. 280 ist nach einem amerikanischen Patent auf der Maschinenachse eine Magnetspule N aufgebracht, welche der Haupterregerspule B entgegenwirkt (U. S. P. der Stanley Co.).

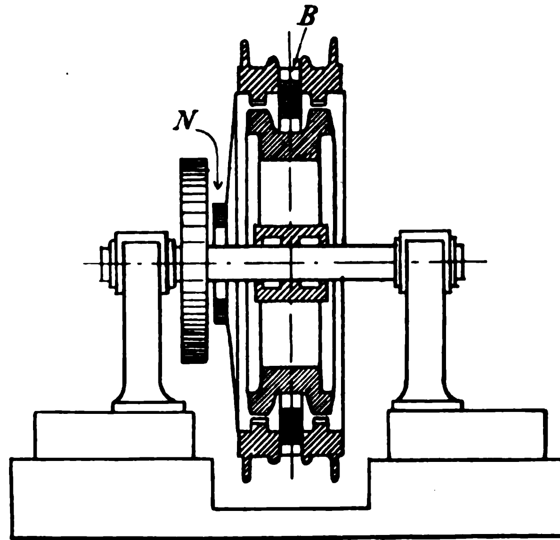


Fig. 280.

In die Figg. 281 u. 282 sind die verschiedenen Streufelder der Induktortype eingezeichnet. F_1 ist das Hauptfeld; F_2 der Streufluss, der durch die Pollücken geht; F_3 der Streufluss, der seitlich um die Ankerspulen verläuft, und F_4 streut im Anker von Spule zu Spule.

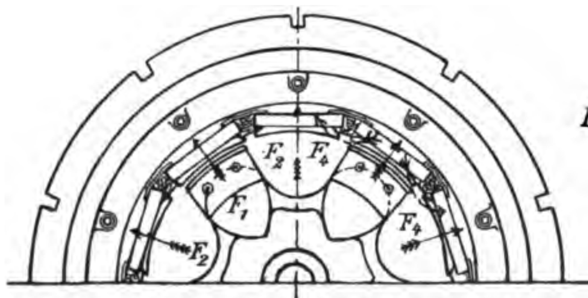


Fig. 281.

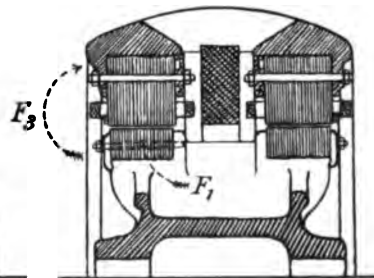


Fig. 282.

39. Ankerstreuung.

§ 126. Allgemeines über Ankerstreuung. Die Ankerstreuung oder Selbstinduktion ist um so grösser, je grösser die Drahtzahl auf dem Anker, je grösser der Ankerstrom, je breiter der Anker, je kleiner der Durchmesser und je stärker das Hauptfeld ist. Um die Streuung innerhalb gewisser Grenzen zu halten, darf die Zahl der Ampèredrähte pro Centimeter Umfang eine gewisse Grösse nicht überschreiten. Grosse Luftinduktion, grosse Umfangsgeschwindigkeit, geringe Polzahl, geringe Wechselanzahl sind günstig für geringe Ankerstreuung. Diese von Kolben und später von Rothert angegebenen Forderungen erklären sich indes direkter aus der damit verknüpften günstigen Disposition der Nuten. Das Streufeld

§ 127. Berechnung lässt sich jederzeit (siehe F. Niethammer, E. T. Z. 1899: Über die Kraftlinienverteilung in Nutenankern) aus den Nutenformen berechnen. Die Streulinien-

zahl ist nämlich gleich dem Quotienten aus der magnetmotorischen Kraft und dem magnetischen Widerstand der Streupfade. Das Streufeld lässt sich aus drei Summanden zusammensetzen: 1. Streufeld in der Nute; 2. dasjenige durch die Nutenschlitze bezw. Stege; 3. Streulinien entlang dem Luftzwischenraum. Bei der in Fig. 283 angegebenen Bezeichnung findet sich für das Maximum des Streufeldes pro Polpaar für Dreiphasenanker der Ausdruck (q_1 Nuten pro Pol und Phase): der Ankerstreuung nach F. Niethammer.

$$K'_s = \frac{3}{2}\,\frac{4\pi}{10}\,J\,\frac{Z}{4p}\sqrt{2}\left[\int_0^{b_1}\left(1-\frac{b}{b_1}\right)\frac{db\cdot l}{q_1 g}+\frac{el}{q_1 d}+\frac{\delta l}{q_1(s_f+d+\delta)}\right] \quad (68)$$

Dieser Ausdruck, der praktisch stets einfach zu lösen ist, zeigt, dass die Streuung um so kleiner ist, je weniger tief die Nuten und je weiter sie sind, je

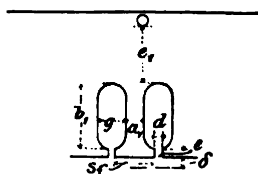


Fig. 283.

breiter der Nutenschlitz und je weniger tief er ist. Ferner ist eine möglichst starke Unterteilung, ein grosses q_1 günstig, ebenso ein grosser Durchmesser, um s_f gross zu halten.

Ich habe die Formel (68) für die praktische Verwendung etwas umgeformt und dann sehr gut übereinstimmende Resultate gefunden. Ich setze

$$K_s' = c'\cdot\frac{JZ}{p}\,\frac{l}{q_1}\left\{\int\frac{F_h}{F}\,\frac{db}{g}+\frac{e}{d}+\frac{\delta}{d+1{,}6\,\delta}\right\}\ .\ .\ .\ (68\text{a})$$

dabei ist c' nach Versuchen $= 3{,}3$, wenn Z bei Dreiphasenmaschinen die Leiterzahl pro Phase ist. Bei Einphasenmaschinen mit Z totalen Leitern ist $c' = 2{,}2$. F ist die ganze Nutenfläche, F_h der mit zunehmender Tiefe b jeweils übrigbleibende Teil der Nutenfläche. Das Integral ist sehr leicht graphisch zu lösen, es ist bei runden Nuten etwa $1{,}32 \times \frac{b}{2g}$, bei langen Nuten ca $\frac{b}{2g}$. Die Zahl $\frac{F_h}{F}$ ist das Verhältnis, das an jeder Stelle der Nute angiebt, wieviel der Nuten-AW noch zur Streuung wirksam bleiben.

Aus K'_s bestimmt sich die elektromotorische Kraft der Streuung

$$E_s = c\,n\,Z\,K'_s\cdot 10^{-8},$$

wenn die Hauptspannung gegeben ist durch $E = c\,n\,Z\,K\cdot 10^{-8}$.

§ 128. Berechnung der Ankerstreuung nach G. Kapp.

Kapp setzt zu näherungsweiser Berechnung der elektromotorischen Kraft der Streuung:

$$E_s = c_s\,E\,\frac{ZJ}{2p\cdot AW}\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ (69)$$

und berechnet für verschiedene Polbreiten die Koeffizienten c_s, die nachstehend zusammengestellt sind. (AW sind die Feld-AW pro Polpaar zur Erzeugung der Leerspannung E). s ist die Spulenbreite.

	Viele Nuten pro Pol und Phase			3 Nuten pro Pol und Phase	2 Nuten pro Pol und Phase	1 Nute pro Pol und Phase	Schleich. Wicklung	Geschl. Wicklung
$\frac{s}{\tau}$	1	$^1/_2$	$^1/_3$	$^2/_9$	$^1/_4$	0	1	$^2/_3$
$P:\tau = {^2/_3}$	0,3	0,66	0,82	0,92	0,76	1,16	0,3	0,73
$P:\tau = {^1/_2}$	0,15	0,33	0,60	0,60	0,30	1,00	0,15	0,40

Bei Gleichpolmaschinen hängt der Koeffizient c_s von der Streuung $k = \frac{K_s}{K}$, siehe S. 121 ab:

k	0,1	0,15	0,20	0,25
$P:\tau = 1$	0,78	0,83	0,88	0,94
$P:\tau = {^4/_5}$	0,70	0,75	0,80	0,88

Kapp vernachlässigt jedoch die Nutenform vollständig, was unzulässig ist und auch experimentell widerlegt wird.

Viele Nuten pro Pol und Phase verringern die Ankerstreuung, ergeben sinusähnliche Kurven, geringere Wirbelströme in den Polen, gleichmässigeren magnetischen Widerstand als wenige, aber sie verbrauchen mehr Isolation, sind teurer und liefern bei gleicher Leiterzahl geringere effektive Spannung als eine Nute pro Pol und Phase.

40. *V*-Kurve.

§ 129. Erklärung der *V*-Kurve.

Einen Maassstab für die Güte einer Drehstrommaschine bezüglich Spannungsabfall liefert die in Fig. 286 wiedergegebene Schaukurve. Der Stromerzeuger wird durch Einleiten von Drehstrom als Synchronmotor be-

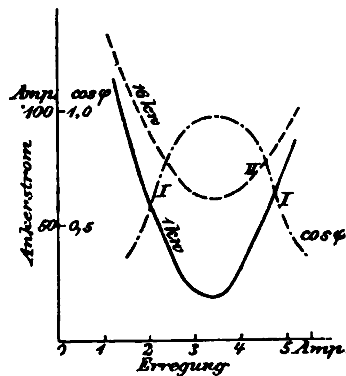


Fig. 284.

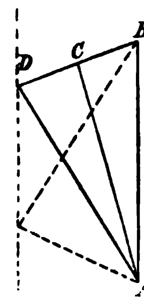


Fig. 285.

trieben, indem er zugleich durch Gleichstrom erregt wird. Bei konstanter Belastung (etwa 1 KW wie in Kurve *I* und 16 KW in Kurve *II*) ändert sich der zuzuführende Ankerstrom mit der Erregung nach Fig. 284. Links vom kleinsten Werte eilt die Spannung dem Strome voraus, an der Stelle

des kleinsten Wertes herrscht Phasengleichheit (cos $\varphi = 1$), rechts davon eilt der Strom der Spannung voraus. Je steiler nun die beiden Äste dieser Kurven ansteigen, desto geringer ist der induktive Spannungsabfall des Stromerzeugers.

Zur angenäherten Konstruktion der *V*-Kurve eignet sich das einfache Diagramm Fig. 285, das unter Bezugnahme auf Fig. 266 ohne weiteres verständlich ist. *AB* sind die Feldampèrewindungen des Generators, der den Synchronmotor betreibt, *BC* die Ankerampèrewindungen (AW) des Generators und *AC* die resultierenden AW, welche für Generator und Motor gleich ausfallen; *AD* und *DC* sind die Feld- bezw. Anker-AW des Motors. Da *BD* proportional dem übertragenen Strom und *AC* proportional der elektromotorischen Kraft ist, die an sich allerdings senkrecht zu *AC* steht, so giebt der Inhalt des Dreiecks *ABD* ein Maass für die übertragene Arbeit. Lässt man bei konstanter Grundlinie *AB* die Spitze *D* auf einer Parallelen zu *AB* sich bewegen, so erhält man in der Linie *AD* jeweils die Abscissen und in der Linie *BD* die zugehörigen Ordinaten der *V*-Kurve und φ als Komplementwinkel zu Winkel *B* (siehe die Kurve für cos φ Fig. 284). § 130. Konstruktion der *V*-Kurve.

41. Phasenverschiebung.

Da jegliche Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bei bestimmter Arbeitsleistung eine entsprechende Vergrösserung der Stromstärke bedeutet, so wachsen mit abnehmendem Leistungsfaktor des Netzes die Verluste und die Erwärmung, sowie bei Phasennacheilung die Ankerrückwirkung der Generatoren, oder man ist genötigt, grössere Maschinen aufzustellen, als der gleichen induktionsfreien Last entsprechen würde. Die Drehstrommaschinen werden aus diesem Grunde allgemein unter Angabe der Kilowatt mal cos φ verkauft. Die zuzuführenden Pferdestärken sind dann auch nur das cos φ-fache. § 131. Einfluss des Leistungsfaktors des Netzes.

Um die Phasenverschiebung zu vermindern, die, wie bereits ausführlich erläutert, den Abfall der Klemmenspannung und denjenigen in der Leitung vergrössert, bietet sich das Auskunftsmittel, einen oder mehrere überregte Synchronmotoren — es sind das einfach als Motoren benützte Drehstromdynamos — in der Centrale oder im Netze aufzustellen, die den Leitungsstrom gegen die Spannung vorschieben, falls sie auf dem rechts vom Minimum liegenden Teil der Fig. 284 erregt sind. § 132. Mittel zur Reduktion der Phasenverschiebung.

Da indes diese Motoren, falls sie einen wirksamen Phasenausgleich bewirken sollen, grosse Abmessungen annehmen, sollte man bestrebt sein, sie nicht leer laufen zu lassen, sondern sie zu einer ihnen entsprechenden Kraftabgabe, z. B. für irgend einen Transmissionsantrieb, oder als Umformer zu benützen.

Siehe den interessanten Artikel El. World XXVIII 1896, S. 622 von E. J. Berg: Es ist am günstigsten den Synchronmotor so zu belasten, dass $+\varphi = 45^0$ wird. Um in einer Leitung mit 200 Ampère 1000 Volt den cos φ von 0,5 auf 0,8 zu erhöhen, ist ein 50 KW-Synchronmotor erforderlich.

Synchronmotoren, deren *V*-Kurven (Fig. 284), recht steile Äste haben, erweisen sich als die wirksamsten Phasenregler.

Induktionsgeneratoren — übersynchron angetriebene Asynchronmotoren — eignen sich ebenfalls zur Phasenregelung, indem man in den Ankerkreis

variable Selbstinduktion oder Kapazität einfügt. In Fig. 286 ist eine solche Anordnung skizziert. *a* ist der primäre Teil eines vom Netze gespeisten Induktionsmotors, *b* sein Kurzschlussanker. Dieser Motor treibt den Asynchrongenerator *C* an, dessen primärer Teil *d* auf das Netz arbeitet und dessen Anker *C* auf die Selbstinduktion *f* geschlossen ist. *f* kann durch den drehbaren Eisenstern *e* variirt werden. In dem Kapitel „Induktionsgeneratoren" wird übrigens noch von verschiedenen Methoden zur Erregung des Ankers die Rede sein.

Durch Anordnung von Kondensatoren, die jedoch in mechanischer Hinsicht noch manches zu wünschen übrig lassen und die mittelst besonderer

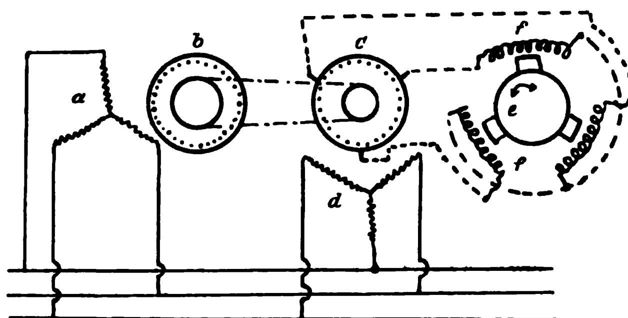


Fig. 286.

Transformatoren an Hochspannung gelegt werden können, lässt sich die Phasenverschiebung ebenfalls kompensieren. Zur vollständigen Kompensation ist, falls *C* die Kapazität, *L* den Selbstinduktionskoeffizienten und *n* die Periodenzahl bedeutet, erforderlich, dass

$$\frac{1}{2\pi n C} = 2\pi L n$$

wird. Als Kapazität bietet sich eventuell das Kabelnetz als solches. Bis jetzt sind dauerhafte Kondensatoren genügender Grösse sehr teuer und die billigen Flüssigkeitskondensatoren für die Dauer unbrauchbar. Am richtigsten ist es, von den Drehstrommotoren an sich einen hohen Leistungsfaktor zu verlangen. Cos $\varphi = 0{,}9$ ist von ganz kleinen Motoren ab schon zu erreichen.

42. Erregung der Wechselstrommaschinen.

§ 188. Fremd- und Eigen-erregung. Eine Wechselstrommaschine kann Fremderregung, Eigenerregung mit kommutirtem Wechselstrom oder gemischte Erregung haben; permanente Magnete sind in der Starkstromtechnik veraltet. Die Fremderregung kann einer besonderen Erregerdynamo, einem beliebigen Gleichstromnetz oder einer Akkumulatorenbatterie entnommen werden. In der Fig. 287[1]) ist eine Maschine mit gemischter Erregung dargestellt: sie ist einmal von aussen von einer besonderen Maschine und dann von einem Kommutator auf der Maschinenachse aus erregt. Eigenerregte Maschinen können entweder Serien- oder Nebenschlusswicklung tragen, je nachdem der ganze Wechselstrom kommutiert

1) Nach JACKSON, Alternating Currents.

wird und wenige dicke Windungen durchfliesst (Fig. 288) oder aber nur ein Zweigstrom kommutiert wird, der viele dünne Windungen durchfliesst

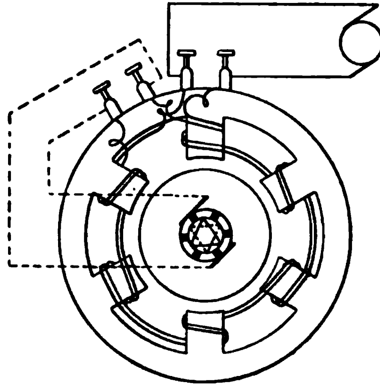


Fig. 287.

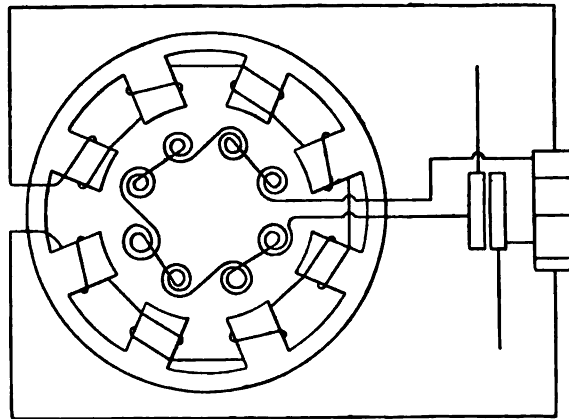


Fig. 288.

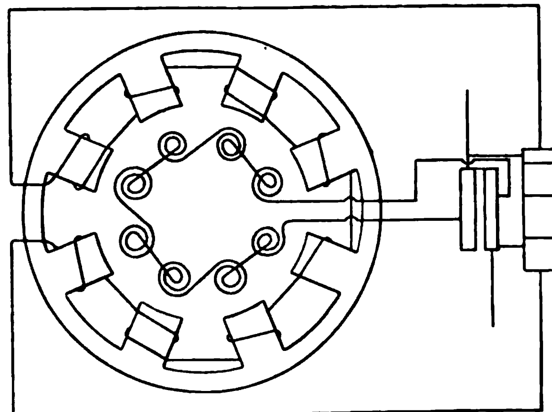


Fig. 289.

(Fig. 289). ZIPERNOWSKY benützte früher die Erregerschaltung Fig. 290: Eine Ankerspule *a* wird ausschliesslich zur Erzeugung des Erregerstromes verwendet, mit ihr im gleichen Kreise liegt noch die Sekundärwicklung *s*

eines Transformators, dessen Primärwicklung p im Hauptstrome liegt, so dass die Erregerspannung mit zunehmendem Hauptstrome steigt. Bei der Anordnung Fig. 291 wird die Erregerspannung in zwei hintereinandergeschalteten Transformatoren erzeugt, wovon der eine an der Netzspannung, der andere im Hauptstrome liegt. Diese Compoundierungen haben alle den Nachteil, dass sie wohl auf die Stromstärke Rücksicht nehmen, aber nicht auf die verschiedene Phasenverschiebung, so das sie nur bei einem bestimmten cos φ

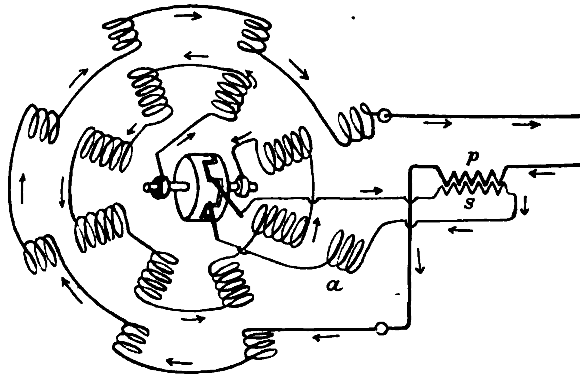


Fig. 290.

richtig wirken können. In der Maschine Fig. 292 ist der Transformator, der den Strom für die Erregung liefert, direkt zwischen die Arme des rotierenden Teiles eingebaut. Der Transformator ist mit A bezeichnet.

Wenn der Anker reine Hintereinanderschaltung trägt, ist es auch angängig nur einzelne Pole mit der Serienwicklung zu versehen, die dünne Wicklung kann dann auf die übrigen oder auf alle Pole verteilt werden.

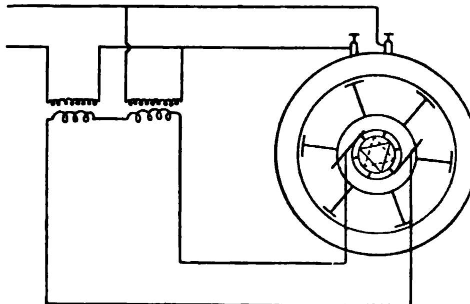


Fig. 291.

Von dieser unsymmetrischen Anordnung wird man jedoch nur in Ausnahmefällen Gebrauch machen. Bei zwei parallel geschalteten Maschinenhälften ist es auch noch möglich die dicke Wicklung nur auf zwei einander gegenüberstehenden Polen unterzubringen.

Die Maschine Fig. 293 hat nach Elihu Thomson zunächst auf acht Polen eine dünne Wicklung, die durch eine besondere Maschine erregt wird. Die Erregermaschine besitzt zwei Regulatoren, einen R_1 im Nebenschluss der Erreger und einen R_2 im Haupterregerkreis. Auf zwei gegenüberstehenden

Polen liegt eine dicke Wicklung, die vom kommutierten Hauptstrom durchflossen wird. Parallel zur dicken Erregerwicklung ist ein dritter Regulator R_3 angebracht, mit dessen Hilfe die Compoundierung der Phasenverschiebung angepasst werden kann. Dieser Widerstand soll überdies die Funkenbildung am Kommutator reduzieren.

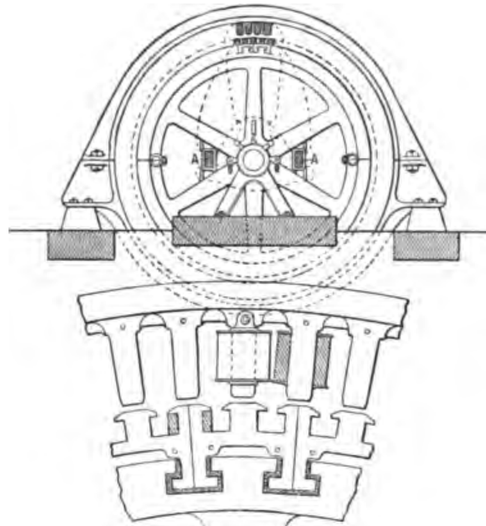


Fig. 292.

Sofern man nicht direkt eine Gleichstromwicklung auf der Wechselstrommaschine anbringt, muss der zur Gleichrichtung dienende Kommutator soviel Segmente als die Maschine Pole besitzen. Diese Segmente sind abwechselnd § 134. Kommutator an den Wechselstrommaschinen.

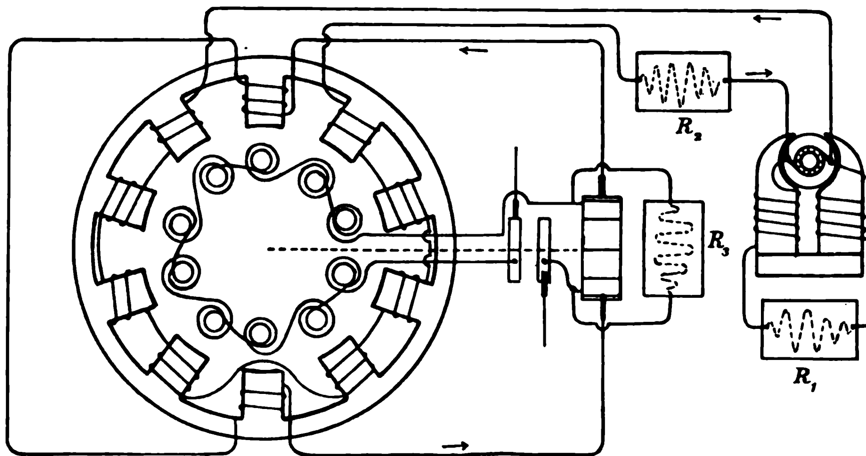


Fig. 293.

leitend miteinander verbunden (Fig. 39 u. 287). Die Bürsten liegen je auf einem anderen Satz der Segmente und zwar derart, dass kommutiert wird, wenn die wechselnde elektromotorische Kraft annähernd Null ist. Ohne Selbstinduktion würde dabei ein pulsierender Erregerstrom (Fig. 294) auf-

treten; derselbe wird jedoch vermöge der ganz beträchtlichen Selbstinduktion der Erregerwicklung fast völlig geglättet (Fig. 295). Es werden also an dem Kommutator ziemlich bedeutende Stromstärken unterbrochen, auch wenn die Kommutierung thatsächlich in dem Moment erfolgt, wenn die erregende Wechselspannung den Wert Null hat. Wegen der damit verknüpften starken Funkenbildung sind diese Kommutatoren auch wieder fast allgemein verlassen worden.

Ganz & Co. hatte früher den Kommutator zwischen den eigentlichen Segmenten mit schmalen Metallstreifen versehen, die unter sich, aber nicht

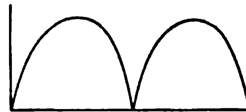


Fig. 294.

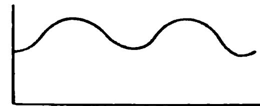


Fig. 295.

nach aussen verbunden sind (Fig. 296). Es wurden zwei Bürstensätze je zu zwei Bürsten verwendet, die um weniges gegeneinander versetzt und die über einen kleinen Widerstand miteinander verbunden sind. In dem Augenblick, in dem die Kommutierung eingeleitet wird, kommen die hinteren Bürsten auf die Zwischenstücke (Fig. 296) und der speisende Stromkreis sowie der Erregerkreis sind über die Verbindungswiderstände der Bürsten kurzgeschlossen. Der speisende Transformator kann so entworfen werden, dass der Kurzschluss nichts schadet. Dieser Kurzschluss soll die Funkenbildung vermindern und zugleich den Erregerstrom mit Hilfe der Erregerselbstinduktion in nahezu voller Stromstärke aufrecht erhalten, jedenfalls besser als bei einer Unterbrechung. In amerikanischen Maschinen kamen statt dieser Anordnung einfach recht starke Kupferbürsten in Anwendung, die ebenfalls beim Kommutieren durch Überbrücken zweier Segmente einen Kurzschluss bedingen. Nach verschiedenen Aufsätzen in E. T. Z. 1892 erhält man bei einphasigem Wechselstrom dann funkenlose Kommutierung, wenn man die Bürsten gegen die Stellung, wo die elektromotorische Kraft gleich Null ist, vorschiebt, um einen Winkel ψ, der bestimmt ist durch

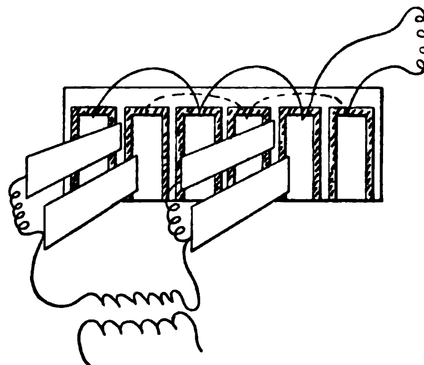


Fig. 296.

$$tg\,\psi = \frac{2\pi n L}{w},$$

worin die Grössen L und w für den gesamten Erregerkreis gelten. Die dann eventuell noch auftretenden Funken, die durch einen abnehmenden Strom erzeugt werden, sollen nach Picou schwach und unschädlich sein. Bei Rückschub tritt zerstörend wirkendes Feuer auf. Jegliche Bürstenverschiebung bedingt eine Verminderung des Stromes.

§ 185. Kommutierung Am günstigsten für das Kommutieren sind Mehrphasenströme, da in diesem Falle sich die Ströme der einzelnen Phasen übereinander lagern. Die Maxima

sind dabei gegeneinander verschoben, sodass ein fast ganz glatter Strom entsteht. Die Wirkung der Selbstinduktion wird damit grösstenteils unschädlich. Bei ∞ vielen Phasen hat man es überhaupt mit glatten Strömen zu thun und die Selbstinduktion spielt keine Rolle mehr[1]). von Mehrphasenströmen.

Ein Stromwender für Mehrphasenströme ist in Fig. 297 nach D. R.-P. 99416 von H. MÜLLER skizziert:

Der synchron laufende Stromwender für die Umformung von Mehrphasenstrom von p' Phasen in Gleichstrom erhält den Wechselstrom durch p' Bürsten B (hier drei für Drehstrom). Die Gleitbahn des Stromwenders besteht aus zwei durch isolierende Zwischenstücke getrennten Segmenten S, die zur Aufnahme der Stromstösse gleicher Richtung dienen. Die Unterbrechung des Stromes erfolgt an einer besonderen, ebenfalls synchron laufenden Vorrichtung F, deren Segmente mit den Segmenten des Stromwenders verbunden sind und

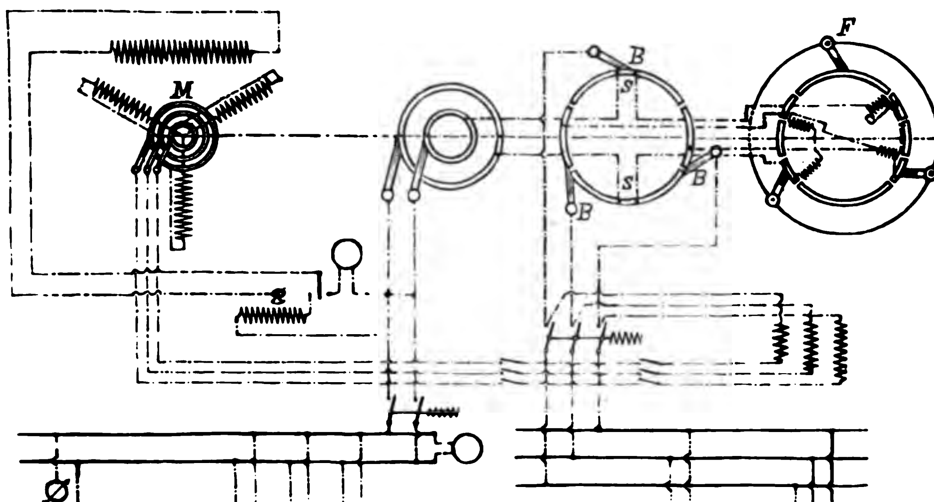


Fig. 297.

durch kurzgeschlossene Bürstensätze so lange in Verbindung gehalten werden, bis die Bürste am Stromwender das entsprechende Segment verlassen hat.

In Compoundmaschinen, deren Serienspule im Hauptstrom liegt, wird die letztere während der Kommutierung immer kurz geschlossen, was aber bei dem geringen Widerstand dieser Spule für die Netzspannung kaum in Betracht kommt.

§ 136. Antrieb der Erregermaschine.

Bei Verwendung von Fremderregung kann der Antrieb der Erregermaschine verschieden erfolgen: Man setzt, wie es vielfach üblich geworden ist, die Erregermaschine direkt auf die verlängerte Generatorwelle[2]) oder auch zwischen das äussere Stützlager und den Anker oder Induktorring, oder man treibt dieselbe durch Riemen, Zahnräder oder Schneckengetriebe von der Hauptwelle aus an. Im ersten Falle wird die Erregermaschine wegen der geringen Tourenzahl verhältnismässig teuer, aber sie verbraucht nur wenig Grundfläche, was nicht selten die Mehrkosten gegenüber Riemenantrieb aufwiegt, abgesehen

1) Drei zweiteilige Stromwender zur Erregung von Drehstrommaschinen siehe D. R. P. 72125.

2) Direkte Kuppelung der Erregermaschine hat den Nachteil, dass man nicht mit voller Erregung anfahren kann.

davon, dass teuere Riemen und deren Unterhaltung in Wegfall kommen. Riemenantrieb birgt überdies die Gefahr in sich, dass ein Abfallen des Riemens bezw. Riemenrutsch zu unangenehmen Betriebsstörungen Veranlassung geben kann. Ein rationell angeordneter Antrieb durch Zahnräder oder Schnecken[1]) giebt wohl häufig die billigste und sicherste Lösung. Allen Antrieben von der Generatorwelle aus haftet der Fehler an, dass bei einer Tourenänderung der Hauptmaschine auch die Geschwindigkeit der Erregermaschine in gleicher Weise variiert, so dass die Spannungsänderungen noch verschlimmert werden. In dieser Hinsicht ist es zweckmässiger, für die Erregung einen gesonderten Antriebsmotor vorzusehen, also eine kleine, schnelllaufende Dampfmaschine oder eine kleine Turbine dafür aufzustellen. Diese Anordnung ergiebt sich im allgemeinen bei gemeinschaftlicher Erregung vieler Maschinen von einer Stromquelle aus von selbst. Es ist jedoch in diesem Falle nicht zu übersehen, für genügende Reserve zu sorgen, da ein Versagen der gemeinsamen Erregermaschine die ganze Anlage ausser Betrieb setzt. Die A. E. G. hat sich durch D. R. P. 99273 einen gesonderten Antrieb von Erregermaschinen durch Wassermotoren geschützt, der nur benutzt wird, wenn für den auf gleicher Achse sitzenden Drehstrommotor keine Betriebsspannung vorhanden ist, was namentlich bei der ersten Inbetriebsetzung der Fall ist.

In manchen Anlagen wird zum Antrieb der Erregermaschine ein synchroner oder asynchroner Motor benutzt, der von den Hauptsammelschienen gespeist wird; die Tourenzahl eines solchen Aggregates schwankt natürlich auch mit den Generatortouren. Neuerdings besorgen nicht selten rotierende Umformer, die sehr wenig Raum beanspruchen, die Erregung. Eine direkte Spannungsregulierung ist dabei nur durch Verwendung eines Hilfsankers oder durch Anordnung eines ruhenden Transformators mit grosser Streuung oder abschaltbaren Spulen möglich.

§ 137. Maschinen mit Selbsterregung durch Ankerrückwirkung u. ä.

Die früher erwähnte Thatsache, dass die Ankerrückwirkung bei Phasenvoreilung die Felderregung unterstützt, hat zu verschiedenen Patenten Veranlassung gegeben, die Wechselstrommaschinen mit Selbsterregung betreffen. Es kommt der Kommutator, überhaupt jede Gleichstromerregerwicklung in Wegfall. Boucherot beschreibt eine Maschine, die zwei Anker besitzt, einen beweglichen und einen festen. Im letzteren wird dadurch, dass er auf Kondensatoren arbeitet, ein erregendes Drehfeld erzeugt, das mit der halben Tourenzahl des drehbaren Ankers umläuft. Durch Verwendung verschieden geschalteter Kondensatoren lässt sich erreichen, dass die Maschinencharakteristik derjenigen einer Serien-, einer Nebenschluss- oder einer Compoundmaschine für Gleichstrom mehr gleicht. Eine andere Maschine von Boucherot besitzt zwei stehende Wicklungen und einen beweglichen Anker aus Eisen. Die Selbsterregung wird durch die verschiedene, variable Selbstinduktion der beiden Wicklungen bedingt.

Routin hat nach Ecl. électr. 14 S. 20 eine Wechselstrommaschine mit Selbsterregung nach Fig. 298 gebaut. Der Erregerstrom wird durch sogenannte unipolare Induktion erzeugt, so dass ein Kollektor nicht nötig wird. Der Generator gehört der Gleichpoltype mit doppeltem Anker an. Die Erregerschleife ist einerseits mit dem Anfang der grossen Erregerspule, andererseits mit einem Schleifring auf der Generatorachse verbunden. Der Schleifring

---

1) Die Schnecke wird hier zur Übersetzung ins Schnelle benutzt und soll dabei einen verhältnismässig ungünstigen Wirkungsgrad haben.

liegt direkt am Gestell, an dem auch das Ende der Erregerspule liegt. Die induzierte Erregerspannung ist proportional der Umlaufszahl und der Kraftlinienzahl pro Pol. Sie ist jedoch stets gering, ca. 1,5 bis 3 Volt, während die Stromstärke zwischen 200 und 400 Ampère angegeben wird. Zum Regu-

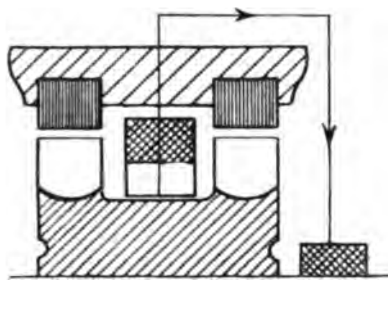


Fig. 298.

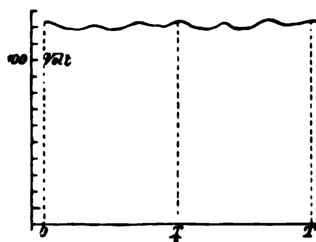


Fig. 299.

lieren der Erregerströme werden mehrere parallele Leiter, die abschaltbar sein sollen, empfohlen.

§ 138. Verlauf des Erregerstromes.

In allen üblichen Wechselstrommaschinen zeigt der Erregerstrom infolge der Ankerrückwirkung, die stets pulsierender Natur ist, einen ondulierenden Verlauf. Der Erregerstrom Fig. 299 gilt für eine Drehstrommaschine von SIEMENS & HALSKE. Der Verlauf lässt sich darstellen durch:

$$1 + \frac{1}{66} \sin\left(6\,\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{132} \sin(2\,\omega t + \pi).$$

43. Mittel zur Konstanthaltung der Maschinenspannung.

§ 139. Erregerregulatoren.

Gerade wie bei Gleichstrommaschinen lässt sich auch bei der Erzeugung von Wechselstrom die Klemmenspannung durch Veränderung der Erregerstromstärke konstant halten. Die für eine bestimmte Strombelastung und Phasenverschiebung erforderliche Erregerstromstärke lässt sich aus den früher besprochenen Diagrammen Fig. 269 entnehmen. Man versieht die Erregermaschine meist mit zwei Stromregulatoren (Fig. 300 u. 301 von SIEMENS & HALSKE), der eine liegt in der Nebenschlusswicklung der Erregermaschine und entspricht der groben Regulierung, der andere liegt im Erregerkreis des Generators und dient zur feineren Regulierung. Bei Serienmaschinen als Erreger müssen natürlich beide Regulatoren im Haupterregerkreis liegen. Man ist jedoch meist von den Serienerregermaschinen wieder abgekommen, da sie bei grossen äusseren Widerständen nicht anpacken, im allgemeinen unökonomischer arbeiten, da gewöhnlich alle Regulierung im Hauptstrom liegt — man kann ja allerdings auch einen Widerstand parallel zur Erregerwicklung legen — und es überdies nicht möglich ist, Beleuchtung von der Erregermaschine abzunehmen, was sehr häufig für das Maschinenhaus verlangt wird. Die Widerstandsstufen müssen so bemessen sein, dass jeder Kontakt die gleiche Spannungsänderung bedingt; es ist also auf die Charakteristik der Erregermaschine und auf diejenige der Hauptmaschine bezw. auf die Ankerrückwirkung der letzteren Rücksicht zu nehmen. Die Charakteristiken

müssen jeweils die zu bestimmten Spannungsänderungen gehörigen Änderungen der Erregerstromstärke liefern. Die Bemessung des Nebenschlussregulators für die Erregermaschine lässt sich an Hand der Fig. 302 nach SCHÜLER, E. T. Z. 1899 ausführen: *A* ist die statische Charakteristik der Erregermaschine, *B* ist die äussere Charakteristik bei einer Belastung in Ampère, die jeweils neben die Erregerspannung geschrieben ist und gleich dem Quo-

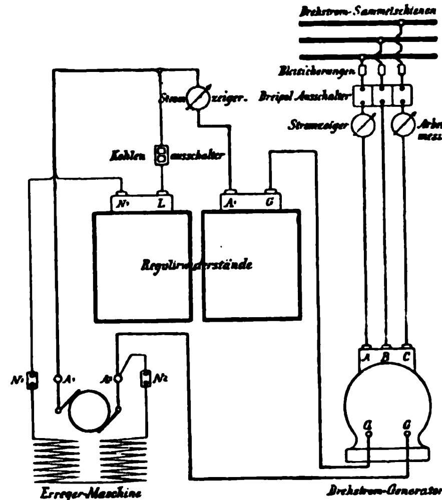


Fig. 300.

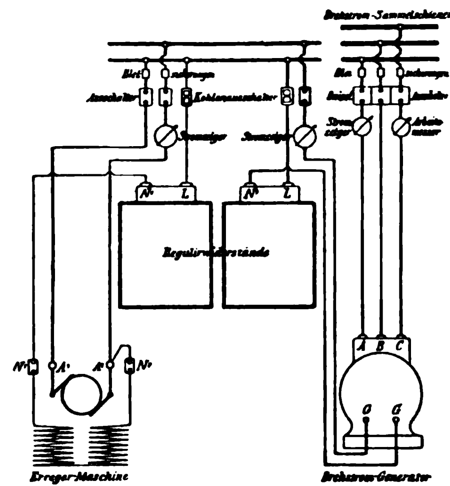


Fig. 301.

tienten aus Erregerspannung und Widerstand der Generatorerregerwicklung ist. Links ist die Beziehung zwischen der Wechselstrombelastung und der Erregerstromstärke für eine gegebene Phasenverschiebung aufgetragen: Für 150 Ampère Belastung findet sich damit z. B. ein Erregerstrom des Gene-

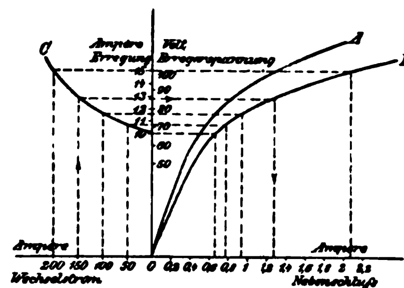


Fig. 302.

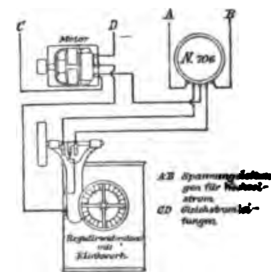


Fig. 303.

rators von 12,9 Ampère, eine Erregerspannung von 86 Volt und ein Nebenschlussstrom von 1,23 Ampère.

§ 140. Selbstthätige Regulatoren. Die Bethätigung der Erregerregulatoren lässt sich selbstthätig ausführen. Es geschieht dies meist so, dass ein Spannungsrelais einen kleinen Motor einschaltet, der den Schalthebel des Regulators im einen oder anderen Sinne bethätigt, Widerstand zu- oder abschaltend. In Fig. 303 ist eine solche Anordnung von SIEMENS & HALSKE skizziert. Das Relais N. 706 ist nach Art eines kleinen asynchronen Motors ausgeführt, den zwei nahezu um 90° ver-

schobene Ströme speisen. Der Kurzschlussanker — eine geschlitzte Kupfertrommel — trägt einen Zeiger, der den Strom des kleinen Schaltmotors schliesst. Ein Klinkenrad auf dem Stufenschalter wird durch eine Schubstange, die der Motor hin- und herschiebt, im einen oder anderen Sinne bethätigt. Diese selbstthätigen Reguliervorrichtungen haben alle den Nachteil, dass sie Spannungsschwankungen nicht rasch folgen können, also träge regulieren, und dass sie nur grobe Schwankungen aufnehmen, da sie andern-

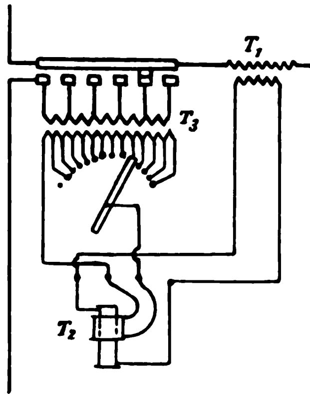


Fig. 304.

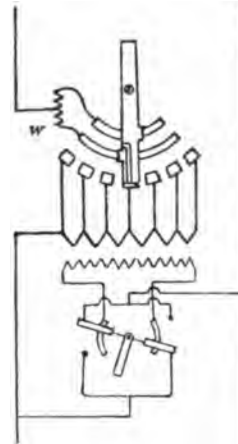


Fig. 305.

falls zu Überregulierung neigen. Die Electric Construction Co. reguliert durch einen Parallelregulator (Flüssigkeitswiderstand) zu der Serienerregerwicklung des Erregers mit Hilfe eines Relais, das auf der Ausdehnung durch Stromerwärmung beruht und das ein Solenoid ein- und ausschaltet.

Statt der Widerstände lassen sich zur Spannungsregulierung auch Drosselspulen im Hauptstrome benutzen oder Transformatoren mit abschaltbaren Spulen. In Fig. 304 ist ein solcher Spannungstransformator skizziert: Ein Transformator T_1 speist einen Transformator T_2, dessen Sekundärspule zur feinen Regulierung verschiebbar ist. An T_2 liegen die abschaltbaren Windungen eines Transformators T_3, dessen sekundäre, ebenfalls regulierbare Wicklung im Hauptstrome liegt. Bei der Anordnung Fig. 305 sind nur die im Hauptstrom liegenden Windungen abschaltbar. Der Schalthebel ist so konstruiert, dass beim Übergang von einer Schaltspule auf die andere ein absoluter Kurzschluss nicht stattfindet. Er trägt nämlich zwei Arme, zwischen denen ein Widerstand *w* bezw. eine Drosselspule liegt, die den Kurzschlussstrom dämpft. Die primäre Wicklung des Transformators kann durch den gezeichneten Umschalter in verschiedenem Sinne an die Aussenleitungen angeschlossen werden, so dass er die Maschinenspannung entweder erhöht oder erniedrigt. § 141. Zusatztransformatoren.

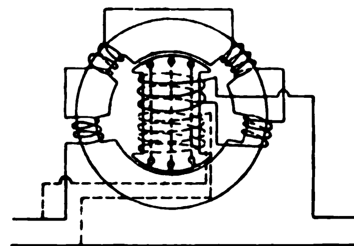


Fig. 306.

Der Zusatztransformator Fig. 306 reguliert die Spannung dadurch, dass ein Kern mit genügendem Luftzwischenraum in einem Gestell gedreht wird,

das vom Hauptstrom durchflossene Spulen trägt. Der Kern ist mit einer Spule bewickelt, die direkt an der Netzspannung liegt, und ferner mit einer Hauptstromspule und einer senkrecht dazu liegenden, in sich kurzgeschlossenen Wicklung. In der gezeichneten Stellung übt der Transformator seine geringste Wirkung, bei einer Drehung um 180° seine stärkste Wirkung aus. Für Drehstromnetze kommen als Zusatztransformatoren Apparate zur Verwendung, die den asynchronen Motoren völlig entsprechen: Der Hauptstrom durchfliesst z. B. den stehenden Teil, während der rotierende Teil an der Netzspannung liegt und um beliebige Winkel gedreht werden kann.

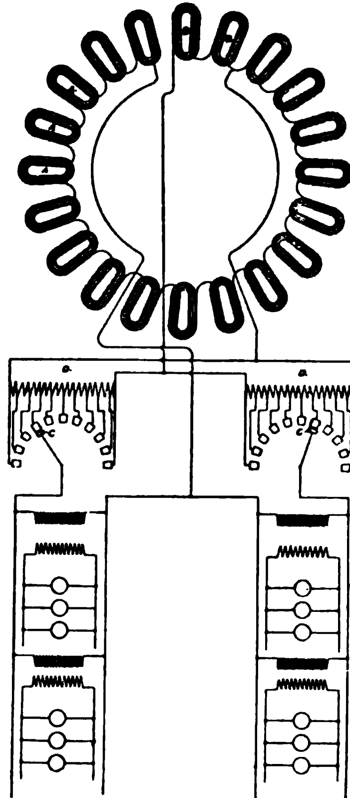


Fig. 307.

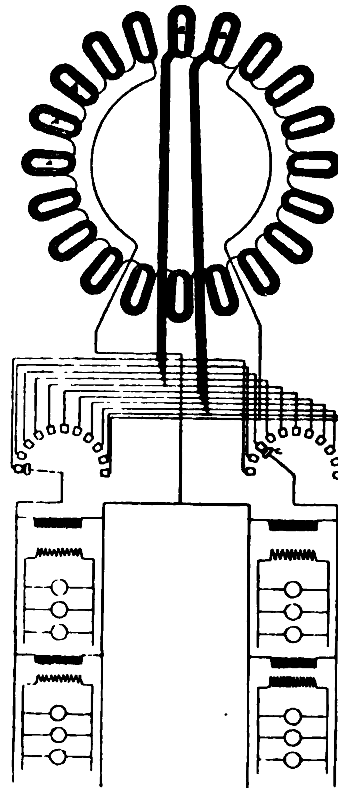


Fig. 308.

Die Spannungsregulierung der zwei Zweige eines Beleuchtungsnetzes kann nach Fig. 307 u. 308 geschehen. In Fig. 307 liegen parallel zu zwei Maschinenspulen *BB* zwei einspulige Schalttransformatoren. In Fig. 308 werden direkt Windungen des Generators zu- und abgeschaltet.

Zur Erzeugung einer der Belastung entsprechenden Zusatzspannung eignet sich der Induktionsgenerator am besten. Derselbe — ein gewöhnlicher asynchroner Induktionsmotor (siehe später) — wird übersynchron angetrieben und wie eine Fernleitungsseriendynamo in die Hauptleitung gelegt. Der Anker ist kurz geschlossen, kann jedoch zur Regulierung auch mit Widerstand oder Kapazität verbunden sein.

Für grössere Drehstrommaschinen kann es angezeigt werden, die Spannungsregulierung von Leerlauf bis Volllast im wesentlichen durch Änderung

der Tourenzahl der Antriebsmaschine zu bewirken, indem man das Regulatorgewicht durch einen kleinen Elektromotor verschieben lässt. Hierbei ändert sich allerdings die Cykelzahl.

44. Besondere Compoundwicklungen.

Die General Electric Co. verwendete früher für ihre Drehstromdynamos zur Aufrechterhaltung der Spannung eine Wicklungsart Fig. 309, die der Compoundierung von Gleichstrommaschinen völlig entspricht. Die in Sternschaltung zu verbindenden Enden der sich drehenden Ankerwicklung werden nicht unmittelbar verkettet, sondern zu drei ebenfalls sich drehenden Lamellen eines Kommutators geführt, von denen aus die drei Zweige über drei auf der Achse angebrachte kleine Widerstände verkettet werden. Zwei diametral gegenüberliegende Bürsten führen zu dem sogenannten Reihenfelde, das durch einen parallel gelegten Widerstand je nach Art der Belastung — ob induktiv oder induktionslos — geregelt werden kann. 70 bis 75 Proc. des Gesamtstromes fliessen in der Reihenwicklung, der Rest in den zwei Nebenschlüssen, dem sich drehenden und dem festen. Die Kommutierung des Stromes kurz vor dem Verkettungspunkt hat den Vorteil, dass am Kommutator keine hohen Spannungen liegen.

§ 142. Compoundwicklungen der Gen. El. Co.

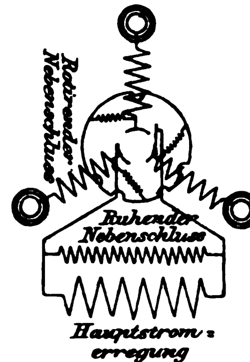
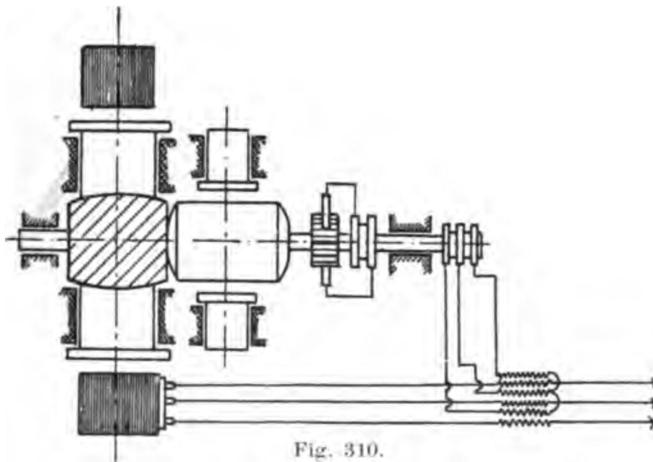


Fig. 309.

Neuerdings baut die General Electric Co. ihre compoundierten Drehstrommaschinen nach einem anderen Princip: Ein Gleichstromerregeranker sitzt Fig. 310 direkt hinter dem Drehstromfeldkreuz auf gemeinsamer Achse.


Fig. 310.

Beide sind für dieselbe Polzahl gewickelt. Neben dem Kollektor sind zwei Schleifringe angebracht, die den Erregerstrom den rotierenden Feldpolen durch die Achse zuführen. Ausserhalb des Lagers liegen drei Schleifringe, die mit den Sekundärwicklungen eines im Hauptstrom liegenden Serientransformators verbunden sind. Von den drei Schleifringen führen in der hohlen

Achse drei Leitungen zu drei in der Phase um 120° versetzten Punkten des Erregerankers, wodurch in demselben ein Drehfeld erzeugt wird, bezw. eine Ampèrewindungszahl, die sich mit den Feldampèrewindungen zusammensetzt. Die resultierende Erregung ist damit abhängig vom Hauptstrom und von der Phasenverschiebung desselben, da sich die im Anker erzeugten Ampèrewindungen unter verschiedenem Winkel mit den Feldampèrewindungen zusammensetzen. Durch entsprechende Wahl der Anschlusspunkte an den Erregeranker, sowie des Serientransformators lässt sich bei allen Belastungen und Phasenverschiebungen konstante Klemmenspannung erzielen.

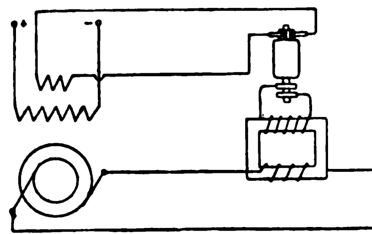


Fig. 311.

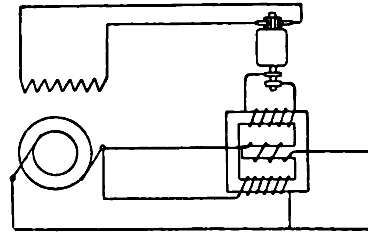


Fig. 312.

§ 143. Compoundierung durch Hauptstromtransformatoren.

Compoundierende Erregeranordnungen mit rotierenden Umformern sind in Fig. 311 u. 312 dargestellt. Die Drehstrommaschine trägt in Fig. 311 zwei Magnetwicklungen: eine Hauptwicklung, die von irgend einer Gleichstromquelle gespeist wird, und eine Hilfswicklung, die von dem Drehstrom-Gleichstromumformer Strom erhält. Den letzteren speist ein Transformator, dessen primäre Wicklung vom Hauptstrom der Maschine durchflossen wird und dessen sekundäre Klemmenspannung dem Hauptstrom proportional ist. Der Umformer wird also in der Erregerwicklung der Drehstrommaschine

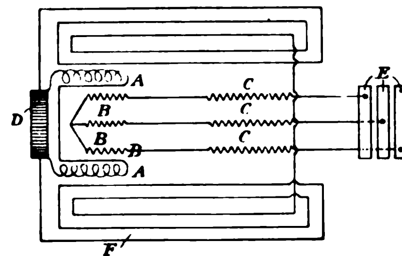


Fig. 313.

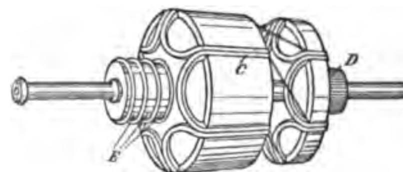


Fig. 314.

einen um so stärkeren Strom erzeugen, je mehr diese belastet wird. Bei richtig gewählten Verhältnissen kann die Klemmenspannung bei allen Belastungen konstant gehalten werden. Der Umformer Fig. 312 liegt an einem Transformator mit magnetischem Nebenschluss; auf diesem Nebenschluss befindet sich eine vom Hauptstrome durchflossene Spule. Fliesst in letzterer kein Strom, so streut ein grosser Teil der Kraftlinien durch den magnetischen Nebenschluss; bei zunehmendem Hauptstrom wird dagegen die magnetische Streuung im Transformator verringert, die Klemmenspannung steigt und infolgedessen wird der Erregerstrom verstärkt. Die Phasenverschiebung berücksichtigen diese Anordnungen nicht.

Da Wechselstrommaschinen mit geringem Spannungsabfall, bezw. geringer Ankerrückwirkung gross und teuer ausfallen, indem die Materialien nicht genügend ausgenutzt werden, auch der Wirkungsgrad verringert wird und trotzdem die Spannung nicht völlig konstant bleibt, so ist das Bestreben immer allgemeiner, durch besondere Kompensationswicklungen den Spannungsabfall aufzuheben, den Spannungsabfall aber an sich ziemlich gross werden zu lassen.

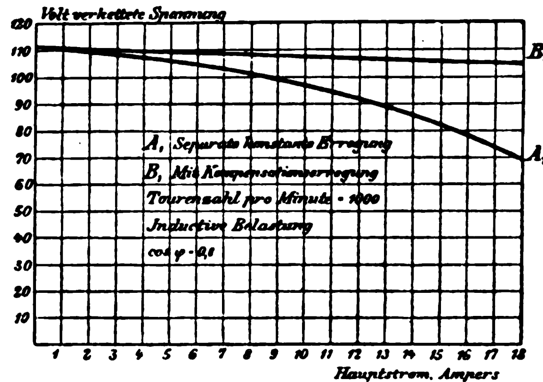


Fig. 315.

In Fig. 310 ist bereits eine solche Anordnung angegeben. Danielson führt denselben Grundgedanken nach Fig. 313—316 aus: Hauptanker C und Erregeranker AB sitzen auf gemeinsamer Achse und haben gleiche Polzahl. In C wird der Drehstrom erzeugt, der durch die Schleifringe E ab- **§ 144. Compoundierung von Danielson.**

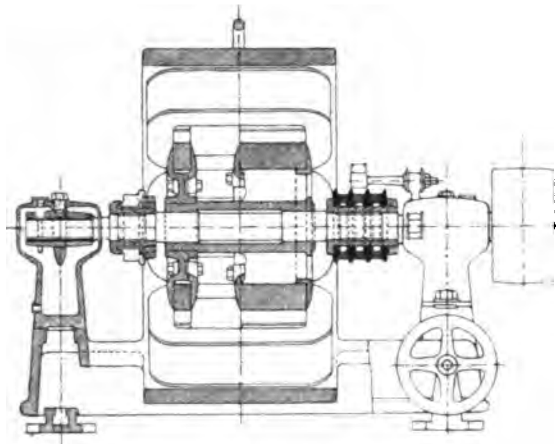


Fig. 316.

genommen wird. Auf dem schmalen Erregeranker sitzt zunächst die Gleichstromwicklung A und dann noch eine Drehstromwicklung B, welche mit zunehmender Stromstärke und zunehmender Phasenverschiebung die Erregerspannung am Kollektor D erhöht. Die beiden Anker haben eine gemeinsame Feldspule F. Die Wirkung der Kompensationswicklung geht aus Fig. 315 hervor.

Die Drehstromwicklung B auf dem Erregeranker ist in umgekehrtem Sinne wie der Anker C angeschlossen, d. h. ist um 180^{0} verschoben, so dass,

wenn die Ankerrückwirkung in C schwächend wirkt, derselbe Drehstrom in B die Erregung verstärkt. Die Versuche ergaben, dass der thatsächlich günstigste Verschiebungswinkel nicht 180°, sondern 170° ist. Ein Durchschnitt durch die nach DANIELSON compoundierte Maschine ist in Fig. 316 gegeben.

§ 145. Compoundierung nach Leblanc. M. LEBLANC hat in dem Bulletin de la Soc. Intern. des Electr. 1898 und 1899 eine lange Abhandlung über die Compoundierung der Wechselstrommaschinen niedergelegt, die sehr beachtenswert ist. Er bestimmt zunächst das Gesetz, nach dem der Erregerstrom bei verschiedener Belastung variieren muss, um konstante Klemmenspannung zu erzielen. Dazu dient eine Gleichung, die seinerzeit bei der Theorie der Wechselstrommaschine nach Dr. BEHN aufgestellt wurde:

$$o = w i + L \frac{di}{dt} + e + J_n \frac{dM}{dt},$$

w ist der äussere Widerstand, L der äussere Selbstinduktionskoeffizient, $i = a \sin \omega t - b \cos \omega t$ der Wechselstrom, $e = E_{max} \sin \omega t$ die Klemmenspannung, J_n der Erregerstrom und $M = m \cos (\omega t + \psi)$ der gegenseitige Induktionskoeffizient.

Es folgt:

$$\left.\begin{aligned} J_n &= \frac{1}{\omega m} \sqrt{(w a + \omega L b + E_{max})^2 + (\omega L a - w b)^2} \\ \operatorname{tg} \psi &= \frac{\omega L a - w b}{w a + \omega L b + E_{max}}. \end{aligned}\right\} \quad . \quad (70)$$

Die besondere Erregermaschine, welche Erregerströme der gewünschten Art erzeugt, ist wie folgt gebaut (es handle sich zunächst um Mehrphasenströme): Auf einer Achse sitzen zwei Ringe A und B (Fig. 317). Auf A ist eine dem Generator entsprechende Drehstromwicklung S_1 angebracht. Diese Wicklung ist direkt hinter die Generatorwicklung geschaltet (Fig. 318). Auf dem Ring B liegt ebenfalls eine gleichartige Drehstromwicklung S_2, die aber parallel

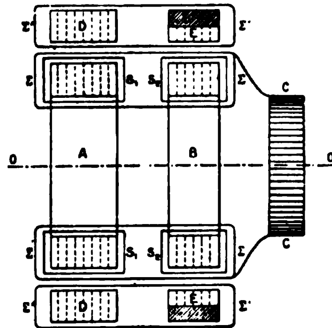


Fig. 317.

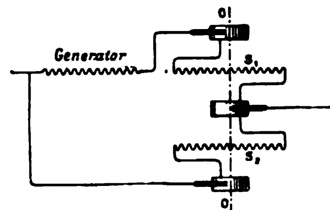


Fig. 318.

zu der Generatorwicklung und S_1 liegt (Fig. 318). Eine Gleichstromwicklung Σ umfasst beide Ringe A und B. Der von dem Kollektor C abgenommene Gleichstrom dient zur Erregung der Generatorpole. Die äusseren feststehenden Ringe DD und EE sind magnetisch derart dimensioniert, dass der magnetische Kreis vom Ringe A bei normaler Stromstärke weit von der Sättigung entfernt ist, während der magnetische Kreis von B stark gesättigt ist. Die Aussenringe umgiebt eine Wicklung Σ'. Dieselbe hat ebensoviele

Windungen wie Σ und ist von dem an C entnommenen Gleichstrom durchflossen (Fig. 319), und zwar in Hintereinanderschaltung mit den Generatorpolen. Die Anschlüsse sind derart gewählt, dass die magnetisierenden Wirkungen der Wicklungen Σ und Σ' sich gegenseitig vollständig aufheben. Die Achse 00 dreht sich synchron mit der Wechselstrommaschine. Die in den Wicklungen S_1 und S_2 erzeugten Drehfelder drehen sich umgekehrt wie die Achse 0, so dass sie im Raume feststehen und in der Gleichstromwicklung eine elektromotorische Kraft erzeugen, die nur von der Stärke der Drehfelder und von der Bürstenverschiebung gegenüber diesen Drehfeldern abhängig ist. Wenn es sich um einphasige Maschinen handelt, so bleibt die Anordnung principiell bestehen, es werden nur die Ringe D und E mit einer Kurzschlusswicklung versehen, welche das eine Drehfeld von den zweien, aus denen ein einphasiges Wechselfeld besteht, aufnimmt und unwirksam

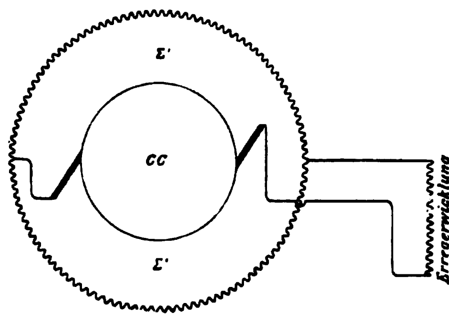


Fig. 319.

macht. Die beiden Ringe A und B sind mit Rücksicht auf ihre Wicklungen um einen Winkel φ gegeneinander zu verschieben, der bestimmt ist aus

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi n L_i}{w_i},$$

und zwar ist A voreilend, wenn man die Rotation der Drehfelder ins Auge fasst. Die magnetischen Verhältnisse des Ringes A und B sind, wie erwähnt, derart, dass bei normaler Generatorbelastung die Sättigung noch ziemlich entfernt liegt; je grösser jedoch die Belastung, d. h. die Stromstärke wird, welche die Wicklung Σ durchsetzt, um so mehr nähert der Ring D sich der Sättigung. Sobald die Proportionalität zwischen Strom und Feld aufhört, compoundiert auch die Erregermaschine unter, womit auch die Gefahr beseitigt ist, dass die Maschine bei Kurzschluss ausbrennt. Es lässt sich leicht erreichen, dass bei Kurzschluss nur 50 bis 100 Proc. mehr, als der normale Strom entsteht. Die Erregermaschine ist selbsterregend; Funkenbildung am Kollektor ist nicht zu fürchten, da die Ankerrückwirkung der Erregermaschine künstlich aufgehoben ist. LEBLANC giebt auch noch an, wie seine Erregermaschine zu bauen ist, wenn sie nicht auf der Generatorachse sitzt, was bei langsam laufenden Maschinen erwünscht wird. Er legt einfach auf die äusseren Ringe D und E über die kompensierende Wicklung noch eine zweite induzierende, die vom selben Strom durchflossen wird und um 90° versetzte Pole schafft. Die Maschine läuft dann als Synchronmotor und der Hauptgenerator liefert die Antriebsenergie. In Fig. 320 u. 321 ist diese Ausführungsform der Erregermaschine nach LEBLANC gezeichnet.

Die Bezeichnungsweise ist dieselbe wie oben. Die dreiphasigen Wechselströme werden durch sechs Schleifringe zugeführt. Damit der Ring *E* früher gesättigt ist als *D*, sind die Pole von *E* in Richtung des Umfanges schmäler als bei *D*. In den Polschuhen von *D* und *E* sind Kurzschlusswicklungen unter-

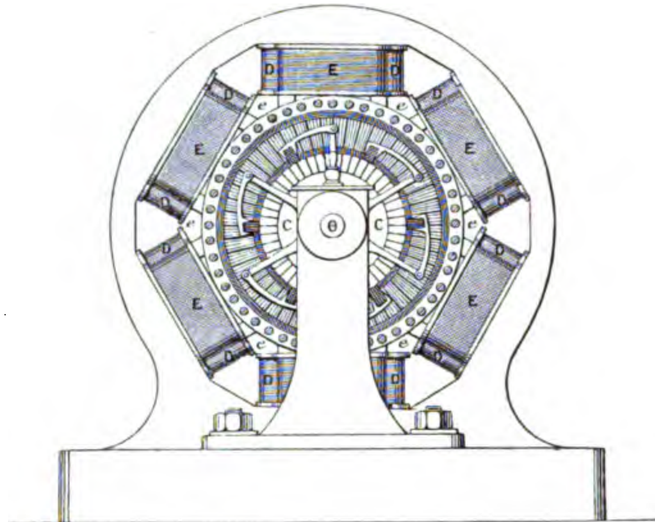


Fig. 320.

gebracht, die den synchronen Lauf befestigen und bei einphasigem Wechselstrom die Ondulationen aufnehmen sollen. Das Stromlaufschema bei Benutzung eines zwischengeschalteten Reduktionstransformators ist in Fig. 322 entworfen.

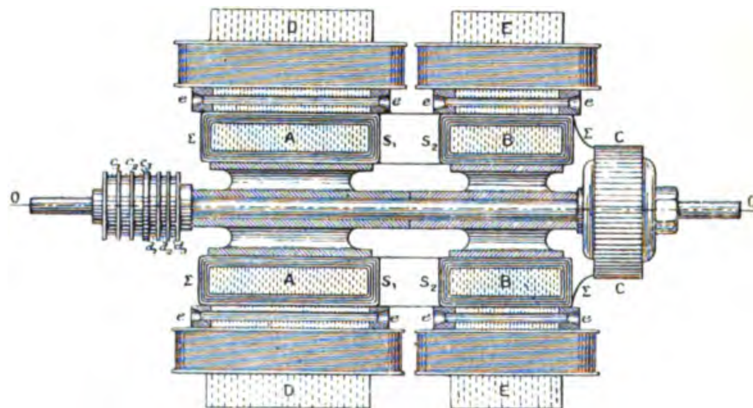


Fig. 321.

Zur Inbetriebsetzung einer solchen Erregermaschine ist eine kleine Gleichstrommaschine erforderlich, welche sowohl die Wechselstrommaschine zunächst erregt, als auch die Erregermaschine antreibt. Das Anlassschema entspricht Fig. 323.

Es ist zuerst nach dem Schema rechts die Hilfsmaschine *H*, die Erregermaschine *E* und die Erregerwicklung *R* des Generators hintereinander ge-

schaltet. Haben Erregermaschine und Generator gleiche Touren und gleiche Phase, was an den Phasenlampen l_1 und l_2 zu erkennen ist, so wird der sechsteilige Ausschalter *I* geschlossen und das Aggregat ist für Dauerbetrieb geschaltet. Zur Ermöglichung einer gewissen Regulierung von Hand ist in die eine der beiden Wicklungen der Erregermaschine ein induktiver Widerstand S_i eingeschaltet und in die Leitung zur Erregerwicklung des Generators

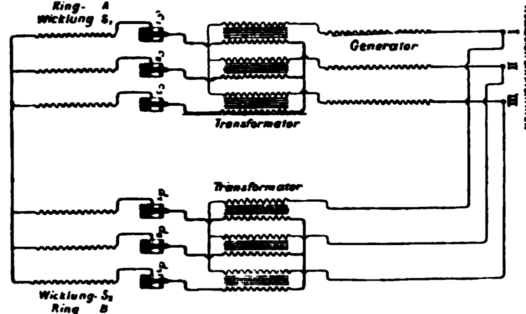


Fig. 322.

ein Widerstand *M*. Nach der Inbetriebsetzung wird die kleine Hilfsmaschine *H* durch *J* kurzgeschlossen und zwar allmählich durch den Parallelregulator m_1. Auch der Anker der Erregermaschine *E* ist mit einem Parallelregulator m_2 versehen.

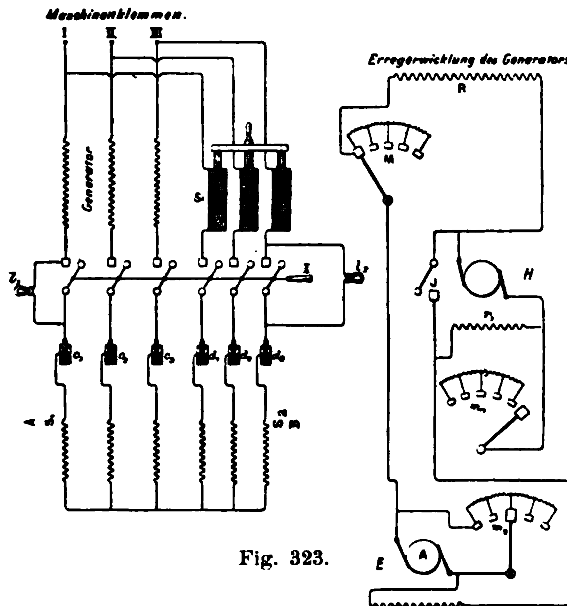


Fig. 323.

Die Bleche, die Leblanc zum Aufbau der Erregermaschine verwendet, sind in Fig. 324 skizziert. Die Wechselstromwicklungen liegen in den runden Nuten und zwar besteht die Serienwicklung S_1 direkt aus 14 mm starken Kupferstäben. In den rechteckigen Nuten liegen die verschiedenen Gleichstromwicklungen. Die Maasse des Gestelles sind durch Fig. 325 gegeben. Versuche an einem zweiphasigen Generator, der zur Erzeugung des Kurz-

schlussstromes gleich dem normalen dreimal soviel Erregerstrom brauchte als zur normalen offenen Spannung, ergaben mit der behandelten Erregermaschine, dass der Generator bei cos $\varphi = 0{,}9$ und nahezu voller Stromstärke noch übercompoundierte.

§ 146. Spannungsschwankung bei Tourenänderungen. In kleineren Anlagen, wo ein Generator z. B. von einer Turbine gespeist wird, kann die Aufgabe gestellt werden, auch bei variabler Tourenzahl bezw. bei starken Tourenschwankungen konstante Spannung zu erreichen. Dies

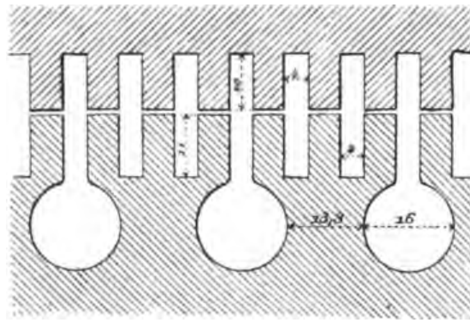


Fig. 324.

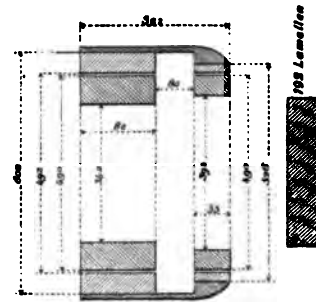


Fig. 325.

ist im allgemeinen sehr schwierig und wo immer möglich durch gute Regulatoren der Antriebsmaschinen zu erzielen. Elektrisch giebt es folgenden Weg: Man schaltet in den Erregerkreis des Generators eine kleine Dynamo ein, die der Haupterregerspannung entgegenwirkt, so jedoch, dass die Differenz der beiden Spannungen noch genügend Erregerstromstärke liefert. Die Hilfsmaschine wird von derselben Transmission wie der Generator angetrieben. Läuft also der Generator langsamer, so thut dies auch die Hilfsmaschine, die ihre Gegenspannung vermindert, so dass mehr Erregerstrom zum Fliessen kommt und die Spannung bei richtiger Abgleichung wieder auf den früheren Wert gebracht werden kann.

45. Unterbrechung des Erregerkreises bezw. von Kreisen mit grosser Selbstinduktion.

§ 147. Mittel zur Aufnahme des Extrastromes. Bei der Unterbrechung von Drahtspulen mit Eisenkernen treten Spannungen auf, die die unterbrochene Spannung um das Zehnfache und mehr übersteigen können (siehe NATALIS E. T. Z. 1898). Zur Reduktion der Extraspannungen beim Ausschalten giebt es verschiedene Mittel:

1. Es wird in den Stromkreis vor dem Abschalten viel induktionsfreier Widerstand geschaltet, so dass nur eine geringe Stromstärke zu unterbrechen ist. Dabei ist zu beachten, dass der Erregerstrom verschiedene Sekunden braucht, bis er thatsächlich entsprechend dem vorgeschalteten Widerstand gesunken ist.

Unter diese Rubrik fallen die zahllosen Ausschalterkonstruktionen mit Kohlenhilfskontakten, da die Kohle einen hohen Widerstandskoeffizienten hat und überdies der Lichtbogen einem allmählich grösser werdenden Widerstand gleichkommt. Fig. 326 giebt die Abbildung eines Erregerstrom-Ausschalters mit Hilfskontakt aus Kohle von SIEMENS & HALSKE.

2. Der Extrastrom wird dadurch unschädlich gemacht, dass parallel zur unterbrochenen Spule S ein induktionsfreier Widerstand W gelegt wird (Fig. 327). Derselbe sollte kleiner als der fünffache Spulenwiderstand sein. Um einen dauernden Stromverlust zu vermeiden, kann er erst eingeschaltet werden, wenn der Erregerstrom unterbrochen wird. Die Fig. 328 zeigt einen solchen



Fig. 326.

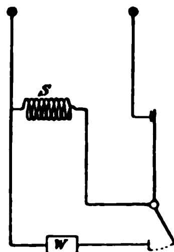


Fig. 327.

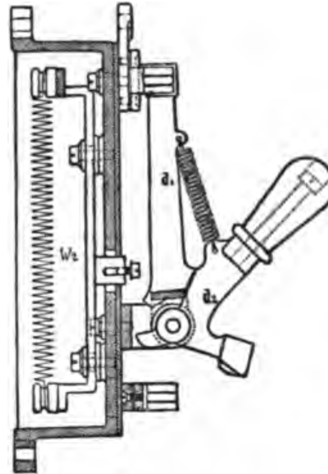


Fig. 328.

Nebenschlussausschalter von SCHUCKERT & Co. W_2 ist der induktionsfreie Widerstand. Die Unterbrechung der Erregung ist als Schnappausschalter a_1 ausgebildet, der untere Hebel schliesst die Erregung auf den Widerstand W_2. Statt des induktionsfreien Widerstandes, der häufig aus Glühlampen besteht, kann auch ein Kondensator parallel zur Stromunterbrechung gelegt werden.

Unterbrechungen von Wechselströmen verursachen gewöhnlich geringere Funkenbildung als solche von Gleichstrom.

E. Effektverluste und Erwärmung.

46. Effektverluste in Wechselstrommaschinen.

§ 148. Aufzählung der Effektverluste.

Die Verluste in einer Wechselstrommaschine setzen sich ähnlich wie bei Gleichstrommaschinen zusammen aus:

1. Effektverlust in der Ankerwicklung,
2. Effektverlust in der Erregerwicklung,
3. Hysteresis- und Wirbelstromverluste, überhaupt Eisenverluste in dem Ankereisen, in dem Feldgestell, namentlich auch in den Polschuhen.
4. Effektverluste durch Reibung in den Lagern, sowie der Bürsten und durch Luftreibung.

47. Verluste in der Ankerwicklung.

§ 149. Ohm'scher Verlust.

§ 150. Wirbelstromverluste in den Leitern.

Der Verlust in der Ankerwicklung ist zunächst $p' J^2 w$, wobei w der Ankerwiderstand pro Phase mit Rücksicht auf die auf Seite 93 besprochene Oberflächenwirkung, J der effektive Ankerstrom pro Phase und p' die Phasenzahl ist.[1]) Dazu gesellen sich noch die Wirbelstromverluste in den Ankerleitern. Dieselben sind bei Verwendung von Nuten- oder Lochankern gering, da die in den Nuten verlaufende Feldstärke nur ein geringer Bruchteil derjenigen in den Zähnen ist. Die in Nuten verlegten Wicklungen erleiden deswegen auch nur einen geringen Zug in der Umfangsrichtung. Bei glatten Ankern treten jedoch um so stärkere Wirbelströme auf, je grösser die Ausdehnung der Leiter in Richtung des Umfanges ist. Sie sind indes auch bei Nutenankern nicht ausgeschlossen, besonders wenn die Zahnsättigungen hochgehalten werden. Überdies erzeugen die Ankeramperewindungen ein Streufeld, das durch die Nuten geht und Wirbelströme erzeugt. Die Wirbelströme in den Ankerleitern entstehen dadurch, dass ein Teil des Leiters in einem stärkeren Felde liegt wie der andere. Die auf einen Leiter entfallende

---

1) Bei Berechnung des Ohm'schen Widerstandes von Drahtspulen kann man für die Länge λ einer Windung setzen, wenn man nicht die thatsächliche Wickellänge genau kennt,

$$\lambda = 2\,(l + c' \cdot \tau)$$

l ist die Ankerlänge, τ der Bogen von Mitte Nute zu Nute, in die gewickelt wird. c' hängt von der Ausführung ab und ist bei Drehstrom im Mittel 1,6, für Hochspannung bis 2,0; bei Einphasenstrom 1,3—1,4.

Differenz in der Induktion sei B_d. Sie ist im allgemeinen an den Polkanten am grössten und namentlich an den Polkanten, an denen durch Ankerrückwirkung eine Feldsteigerung auftritt. Diese Wirbelstromverluste sind bei belasteter Maschine grösser als bei der leerlaufenden; man spricht deshalb von zusätzlichen Wirbelstromverlusten bei Belastung. Die Wattverluste pro Kubikcentimeter berechnen sich für die achsialen Stücke bei kreisförmigem Querschnitt zu

$$\frac{10^{-16}}{4{,}5\,\sigma} n^2 B_d^2 d^2,$$

bei rechteckigem zu

$$\frac{10^{-16}}{6{,}7\,\sigma} \pi^2 n^2 B_d^2 D^2 \quad \ldots\ldots\ldots (71)$$

(d Drahtdurchmesser, σ Widerstandskoeffizient, D Diagonale, $\pi = 3{,}14$).

Ausserdem werden aber auch noch in den Stirnverbindungen der Ankerleiter durch die Streufelder Wirbelströme induziert und zwar in zwei Richtungen, einmal in den radialen Längsschnitten und dann im Querschnitt selbst (siehe F. Niethammer, E. T. Z. 1898, S. 690). Der Betrag in Watt pro Kubikcentimeter hierfür ist, wenn B_s die Streufelddichte ist, für rechteckigen Querschnitt (h Seite senkrecht zu B_s, f Querschnitt, ν = lange zu kurze Seite).

$$\frac{10^{-16}}{4} \frac{\pi^2}{1{,}56\,\sigma} n^2 B_s^2 h^2 + \frac{\pi^2 \cdot 10^{-16}}{32\,\sigma} n^2 B_s^2 \frac{f}{1+\nu},$$

für runden (d Durchmesser):

$$\frac{3 \cdot 10^{-16} \cdot \pi^2}{16 \cdot 1{,}56 \cdot \sigma} n^2 B_s^2 d^2 + \frac{\pi^2 \cdot 10^{-16}}{16\,\sigma} n^2 B_s^2 d^2. \quad \ldots (72)$$

Die Wirbelstromverluste in den Ankerleitern lassen sich durch starke Unterteilung derselben reduzieren. Günstig wirkt auch ein Abhauen oder Abschrägen der Polschuhe, damit das Feld allmählich auf Null fällt.

Zu den Verlusten in der Ankerwicklung sind noch die Verluste durch Übergangs- und Leitungsverluste an den Schleifringen bei rotierenden Ankern zu zählen. Der Übergangswiderstand bei Metallbürsten ist bei den üblichen Umfangsgeschwindigkeiten ca. 0,01 bis 0,03 Ohm pro Quadratcentimeter, bei Kohlenbürsten 0,1—0,4. § 151. Übergangsverluste.

Die eigentliche Erregerenergie ist gleich $J_n^2 w_n$, wenn J_n der Erregerstrom, w_n der Erregerwicklungswiderstand ist. Dazu sind jedoch noch die Verluste in der Erregermaschine und den Regulatoren zu rechnen.

48. Eisenverluste.

Die Hysteresisverluste wachsen angenähert mit der Cykelzahl und rascher als die maximale Induktion. Steinmetz hat eine Beziehung aufgestellt, nach der die Hysteresisverluste der 1,6. Potenz der maximalen Induktion proportional sein sollen. Diese Beziehung ist jedoch nur für die lineare Magnetisierung, wie sie in Transformatoren üblich ist, zwischen $B_{max} = 2000$ und 10000 angenähert richtig; für die drehende Magnetisierung, wie sie in Gleich- und Wechelstrommaschinen auftritt, und besonders für halbe cyklische Magnetisierung (Gleichpoltype) weicht sie weit von der Wahrheit ab. Am besten bestimmt man sich für die benützte Eisensorte eine Kurve, aus welcher sich § 152. Hysteresisverluste.

die Hysteresisverluste für jede Induktion ergeben. KAPP giebt für dieselben ungefähr die folgenden Werte, wenn A_H der Wattverlust pro kg bei 100 Perioden ist

$B/_{1000}$	2	4	6	8	10	12	15	20
A_H	0,7	1,6	3,3	6	7	12	17	28
A'_H	1	4	8	14	20	27	35	80

Die Werte A'_H sind vom Verf. für thatsächlich drehende Magnetisierung beobachtet und zwar als Mittel zahlreicher Proben. Die ballistisch oder durch Wechselstrommagnetisierung (lineare Magnetisierung) gefundenen Werte sind viel zu niedrig. Im Nachfolgenden wird die STEINMETZ'sche Beziehung nur zu gewissen vergleichenden Berechnungen benutzt, da es keine andere einfache Beziehung giebt.

§ 153. Wirbelstromverluste.

Die Wirbelstromverluste pro Kubikcentimeter sind in Watt:

$$\varepsilon\, n^2 \left(\frac{c}{2}\, B_{max}\right)^2 \cdot 10^{-7} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (73)$$

$\frac{c}{2}$ ist der Formfaktor (siehe Seite 44), der durch das betrachtete Feld erzeugten elektromotorischen Kraft. Der Koeffizient ε wird gewöhnlich $= \frac{d^2}{\sigma}\, 10^{-12}$ bei rundem Eisendraht und $13\, s^2 \cdot 10^{-12}$ bei s cm starken Blechscheiben gesetzt. Derselbe ist jedoch auf Grund einer Entwicklung gefunden, welche lineare Magnetisierung voraussetzt, während es sich hier um drehende handelt, bei welcher nach theoretischen Erwägungen und nach Versuchen der Koeffizient ε 1,3 bis zweimal grösser ist als angegeben.

§ 154. Wahl der Eiseninduktion.

Das Gesagte zeigt jedenfalls, dass die Eisenverluste mit der Induktion und mit der Cykelzahl rasch zunehmen, weshalb bei Verwendung hoher Cykelzahlen die Induktionen immer kleiner gewählt werden müssen. In der Praxis sind folgende Induktionen im Ankerblech üblich geworden:

Perioden	B
40	4500—7500
50	4000—7000
60	3500—6000
80	3000—5000
100	2500—4500
120	2000—4000

Die Induktionen können indes um so grösser werden, je besser die Kühlung ist und je kleiner der Wirkungsgrad ausfallen darf.

§ 155. Einfluss der magnetischen Weglänge; drehende Magnetisierung.

Bei der Berechnung der Eisenverluste in den Ankerkernen sind noch zwei Punkte zu berücksichtigen:

1. Die Verteilung der Induktion über den Querschnitt ist eine ungleichförmige, da die Kraftlinienwege an verschiedenen Stellen verschieden lang sind und bei einmal eingetretener Variation der Induktion auch noch die Permeabilität variabel ist. Zur Ermittlung der Eisenverluste ist aber durchaus nicht eine mittlere Induktion massgebend, sondern die Verluste müssen über den Querschnitt integriert werden.

2. Die Magnetisierung in den Ankerkernen ist eine drehende; sie setzt sich aus einer Magnetisierung B_a (Fig. 328a) in Richtung des Umfanges, die gewöhnlich allein berücksichtigt wird, und einer radialen B_b zusammen. Die durch beide erzeugte Hysteresis ist 1,2 bis zweimal grösser als die durch die erste Komponente gegebene. Die Zahl 1,2 bis 2 hängt von dem Verhältnis Polbogen : Teilung und von der radialen Kerntiefe ab. Es ist für jeden Querschnittspunkt am besten, graphisch die grösste Induktion in Richtung des Umfangs und die grösste radiale Magnetisierung zu suchen (siehe E. T. Z. 1899, S. 769) und zu jedem Punkte die Verluste pro Einheit zu bestimmen.

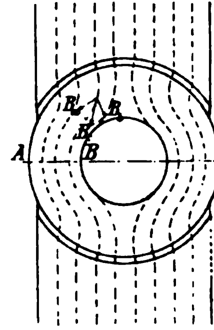


Fig. 328a.

§ 156. Eisenverluste in den Zähnen.

Die Hysteresis- und Wirbelstromverluste in den Zähnen[1]) sind in Watt:

$$V_z \left\{\eta f_1(a) \frac{u}{p \cdot 60} (B_z)^{1,6}_{max} + \varepsilon f_2(a) \left(\frac{u}{p \cdot 60}\right)^2 \left(\frac{c}{2} \cdot B_z\right)^2_{max}\right\} 10^{-7}, \qquad (74)$$

wobei V_z das Zahnvolumen, η und ε Materialkonstanten sind, die für die betreffende Induktion bestimmt sein müssen,

$$\frac{u}{p \cdot 60} = n,$$

B_z die Zahninduktion am Kopf, a das Verhältnis Zahnbreite innen zu der aussen und wobei

$$f_1(a) = 5\,\frac{1 - a^{0,4}}{1 - a^2},$$

$$f(a) = \frac{2}{1 - a^2} \log_n \left(\frac{1}{a}\right).$$

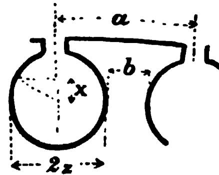


Fig. 329.

Es sind dabei offene Nuten mit rechteckigem Querschnitt vorausgesetzt.

Bei runden Nuten von den Dimensionen Fig. 329 ergiebt sich für die Hysteresis (M. Breslauer):

$$\eta B_z^{1,6} V_z \frac{1}{1 - \frac{\pi}{4}(1 - a)} \cdot \frac{1}{z} \int_0^z \frac{dx}{\left\{1 - (1 - a)\sqrt{1 - \frac{x^2}{z^2}}\right\}^{0,6}} \qquad (75)$$

B_z ist die Induktion im Zahnkopf.

1) Fischer-Hinnen stellt in seinem bekannten Werke die Vermutung auf, dass die Verluste in den Zähnen grösser sind als nachstehend angegeben, da der Kraftlinienwechsel an der Polkante rasch und plötzlich vor sich geht. Ich habe aber diese Erscheinung bei Versuchen nie konstatieren können.

§ 157. Eisenverluste in der Gleichpoltype. Für die Induktor-Gleichpoltype finden sich die Eisenverluste nach Fig. 330 zu

$$10^{-7} V \left\{ \eta \left[\left(\frac{B_a - B_r}{2} \right)^{1,6} + (B_a \cos \varphi)^{1.6} \right] f_1(a) \cdot n + \varepsilon \left[\left(\frac{B_a - B_r}{2} \right)^2 + (B_a \cos \varphi)^2 \right] f_2(a) \cdot n^2 \right\}, \quad \ldots \ldots \quad (76)$$

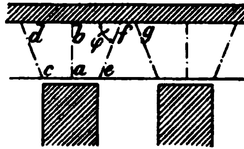


Fig. 330.

wobei B_a die maximale Induktion und B_r die Remanenz am inneren Eisenumfang längs $c\,a\,e$ ist; ferner

$$f_1(a) = 5\,\frac{a^{0,4} - 1}{a^2 - 1};\; f_2(a) = \frac{2}{1 - a^2} \log_n a \text{ und } a = \frac{df}{ce}.$$

Bei der Gleichpoltype werden nicht die bekannten vollen Hysteresisschleifen beschrieben, sondern solche, die ganz oberhalb oder ganz unterhalb der *AW*-Achse liegen. Ihre Form ist auch eine andere als bei voller cyklischer Magnetisierung. Die Hysteresisbeträge auf gleiche Induktionsänderung bezogen sind bei der Gleichpoltype grösser als bei der Wechselpoltype.

§ 158. Vergrösserung der Wirbelstromverluste. Es ist öfters konstatiert worden, dass die Wirbelstromverluste im Ankereisen grösser ausfallen, als sie die Rechnung ergeben würde, allerdings gewöhnlich auf Grund einer sehr angenäherten Berechnung, die den Kraftlinienverlauf und die Kraftlinienverteilung nicht berücksichtigt. Die Eisenverluste werden gewöhnlich auf Grund von maximalen Induktionen berechnet, die sich ergeben, falls das Luftfeld ganz gleichförmig ist. Thatsächlich sind jedoch die Zahnsättigungen oft um 50 und mehr Procent grösser! Bei Nutenankern liegt zweifelsohne ein wesentlicher Grund für die abweichenden Resultate in den Wirbelströmen, die in den durch Feile oder Fräse geglätteten Nutenwänden entstehen. Rechnet man für übliche Nutendimensionen bei einer Verschmierung der Nutenwände auf $^1/_4$ mm Tiefe, was gar nicht selten ist, die Wirbelstromverluste aus, so kann man Beträge erhalten, die bis 50 Proc. der Magnetisierungsarbeit ausmachen.

Parshall & Hobart haben die Eisenverluste in den verschiedenen Stadien der Bearbeitung in Abhängigkeit des Erregerstromes aufgenommen und die Kurven Fig. 331 gefunden:

Kurve 1 nach dem Stanzen,
„ 2 Nuten gerichtet,
„ 3 Nuten leicht gefeilt,
„ 4 nach dem Bewickeln.

Aus den Kurven ist auch das für drehende Magnetisierung eigentümliche Resultat zu entnehmen, dass bei hoher Induktion die Hysteresis pro Kubikcentimeter wieder abnimmt.

Mit zunehmender Temperatur nehmen die Hysteresisverluste zunächst ab und zwar für weiches Schmiedeisen und $B = 3000$ bis 14000 auf 10^0 C. um etwa 1 Proc. Für $B = 4000$ bis 10000 wächst auch die Permeabilität bei 10^0 Temperaturerhöhung um 1,5 bis 1 Proc. Lang andauernde Überhitzung über 100^0 verschlechtert allerdings das Eisen („Aging"). Die Wirbelstromverluste werden bei 10^0 Temperaturzunahme um etwa 5 Proc. kleiner. Die Wirbelstromverluste lassen sich durch weitgehende Unterteilung der Ankerblechscheiben auf ein Minimum reduzieren. Am günstigsten erweisen sich Bleche zwischen 0,3 und 0,5 mm Stärke. Weiter in der Unterteilung zu gehen ist nicht ratsam, da die Bleche zu teuer werden und zuviel Raum durch Isolation zwischen den Blechen verloren geht. Bei dieser Dicke spielt auch die Schirmwirkung der Wirbelströme, die verhindert, dass die Kraftlinien ins Innere der Scheiben eindringen, keine Rolle mehr. Bei 0,5 mm Blechdicke und 30 bis 60 Perioden ist die Induktion in der Blechmitte um etwa 1 bis 2 Proc. kleiner als aussen. Verschiedene Versuche haben ergeben, dass die Isolation zwischen den einzelnen Blechen überflüssig ist, indem schon die natürliche Oxydschicht genügt. Ein Anker, der einmal mit Papier und dann mit zwischen die Bleche gestrichenem Graphit isoliert wurde, welch letzterer bekanntlich etwas leitet, ergab bei etwa 30 Perioden genau gleiche Eisenverluste.

§ 159. Abhängigkeit der Eisenverluste von der Temperatur und Unterteilung.

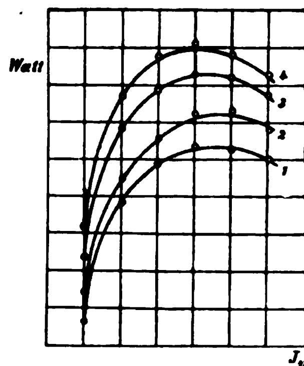


Fig. 331.

Bei Belastung werden die Eisenverluste grösser als bei Leerlauf: 1. weil der Kraftlinienfluss an sich vergrössert wird, um den Ohm'schen Abfall zu decken, diese Vergrösserung ist rechnerisch einfach zu berücksichtigen, und 2. weil die Ankerrückwirkung das Feld verzerrt und zwar um so mehr, je weniger induktiv die Belastung ist. Diese Änderung ist schwer genau festzulegen; sie bedingt hauptsächlich eine Vergrösserung der Eisenverluste in den Zähnen. Theoretisch ist der Gang derart, dass man das Ankerfeld unter Berücksichtigung des bereits vorhandenen Hauptfeldes für jeden Ankerpunkt bestimmt und wieder für jeden Punkt die maximal auftretende Induktion ermittelt, was aber eine sehr mühsame Operation ist und sich meist wegen der Unsicherheit der Hysteresiskoeffizienten überhaupt nicht lohnt.

§ 160. Eisenverluste bei Belastung.

Die Hysteresisverluste sind abhängig von der Kurve der *EMK* bezw. vom Verlauf der Kraftlinienänderung. Spitze Spannungskurven geben bei gleichem Effektivwert kleinere Hysteresisbeträge als flache, und zwar finden sich praktisch Differenzen bis $\pm$ 20 Proc. in den Verlusten, sinusförmigen Verlauf als Einheit vorausgesetzt. Die Wirbelstromverluste hängen nur vom Effektivwert der *EMK* ab.

Bei allen Nuten- und Zackenankern treten auch in den Polschuhen, eventuell im ganzen Feldgestell pulsierende Kraftlinienflüsse auf, die Hysteresis und Wirbelströme erzeugen. Es sind dabei zwei Fälle zu unterscheiden: 1) Es ändert sich nur die Kraftliniendichte an einer bestimmten Stelle der Pole mit der Nutenstellung, der Gesamtkraftlinienfluss bleibt aber während der Drehung konstant. 2) Bei verschiedener Ankerstellung ist der gesamte magnetische Widerstand verschieden. Es treten Schwankungen im ganzen Maschinengestell auf. Dies ist merklich nur bei Zackenankern und sehr

§ 161. Eisenverluste in den Polen.

grobgeteilten Nutenankern, wenn die Nuten weit offen sind, und namentlich bei der Induktortype der Fall. Berechnet man aus den Abmessungen die grösste Änderung des magnetischen Widerstandes, so ist damit die grösste Änderung der Induktion gegeben und es lassen sich Hysteresis und Wirbelströme für den zweiten Fall berechnen. Bei grossen Schwankungen kann es nötig werden, die ganze Maschine zu lamellieren.

Für den Einfluss der ungleichen Kraftlinienverteilung durch die Nuten selbst ist in E. T. Z. 1899, S. 766 eine Entwicklung gegeben. Die Kraft-

Fig. 332.

linien treten aus einem Zahn aus und verbreitern sich gegen den Pol annähernd nach einem Trapez. Es ist (Fig. 332) $GB = a$, $FA = na$, $FG = b$,[1] $Gx = x$, $Fy = nx$, $xy = y$, φ der Winkel zwischen der Richtung xy und FG. Die Kraftlinenzahl K_z pro Zahn ist

$$K_z = \frac{4\pi}{10} AW \cdot l \frac{n+1}{2} b \int_{-a}^{+a} \frac{dx}{b^2 + (n-1)^2 \cdot x^2}$$

oder

$$K_z = \frac{4\pi}{10} AW \cdot l \frac{n+1}{n-1} \operatorname{arc\,tg} \left[(n-1)\frac{a}{b}\right]. \quad . \quad . \quad . \quad (77)$$

AW ist die Ampèrewindungszahl, die zur Überwindung des Luftwiderstandes zur Verfügung ist. Der grösste Wert von B_{max} am Polschuhrand ist

$$B_{max} = \frac{4\pi}{10} AW \cdot \frac{n+1}{2nb}$$

und

$$B_{max}/B_{min} = 1 + (n-1)^2 \frac{a^2}{b^2}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (78)$$

K_z wird für einen bestimmten Wert von n, der n_0 heisse, ein Maximum. Überschreitet man diesen Wert von n_0, d. h. macht man die Nuten bei gegebener Zahnstärke noch breiter, so stellt sich die Kraftlinienverteilung 333 ein und die Kraftliniendichte schwankt zwischen B_{max} und Null, bezw. der Remanenz B_r. In diesem Falle ist eine bedeutende Erwärmung der Polschuhe bestimmt zu erwarten. In Fig. 334 sind in Abhängigkeit von $\frac{a}{b}$ die Werte von n_0 graphisch (ausgezogene Kurve) aufgetragen. Experimentell findet sich, dass die Grenze, bei der die Polschuhverluste beträchtlich werden, etwas höher liegt (mit experimentell bezeichnet). Bei gegebenem Durchmesser des Ankers und einem bestimmten Luftspalt kann man angenähert sagen, dass man ohne Rücksicht auf das Verhältnis Zahnbreite : Nutenbreite unter eine gewisse Zähnezahl nicht gehen darf.

1) Bei Ankern mit Bandagen, die vertieft liegen, ist für b nicht der einfache Luftzwischenraum einzusetzen, sondern ein grösserer Wert. Derselbe ist um so grösser, je breiter und je tiefer die Bandagen sind.

Für die Verluste in den Polschuhen lässt sich auf Grund der theoretischen Entwicklungen E. T. Z. 1899, S. 767 nach experimentellen Resultaten in Watt annähernd setzen:

$$u z V \left(\frac{B_{max} - B_{min}}{2}\right)^{1,6} 10^{-13} + \frac{4 \cdot 10^{-15} u^2 z^2 \left(\frac{B_{max} - B_{min}}{2}\right)^2 n^2 a^2 V}{1 + \left(\frac{u D^2 \mu}{10^5 z \sigma}\right)^2} \qquad (79)$$

V ist das Volumen, das der Kraftlinienänderung ausgesetzt ist, gewöhnlich die ganzen Pole bezw. die Polschuhe. B_{max} und B_{min} gilt für den Polrand, u ist die minutliche Umlaufszahl, z die Zähnezahl, D der Durchmesser, a die halbe Zahnkrone, $n a$ die halbe Zahnteilung, μ die Permeabilität, σ der spezifische Widerstand von Eisen (= 0,1). Durch Abschrägen der Polschuhe lassen sich diese Verluste stets etwas verringern, da $B_{max} - B_{min}$ an den Polkanten stets am grössten ist.

Was nun die Unterteilung der Polschuhe anbetrifft, so kann dieselbe entweder in achsialer Richtung oder senkrecht dazu erfolgen. Die achsiale Unter-

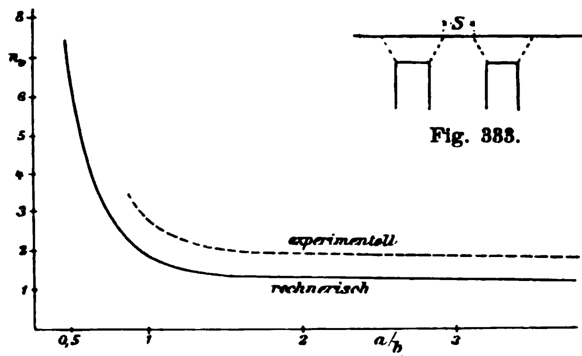


Fig. 333.

Fig. 334.

teilung sollte jedenfalls kleiner als $2 n a$ sein, um wirklich wirksam zu sein. Während für die Blechdicke $2 n a$ und grösser in obige Formeln für die Induktion der volle Wert

$$\frac{B_{max} - B_{min}}{2}$$

einzusetzen ist, verbleibt für Blechdicken $\varepsilon n a$ angenähert nur

$$\frac{\varepsilon}{4} (B_{max} - B_{min}).$$

Die Berechnung der Wirbelstromverluste bei einer Unterteilung senkrecht zur Achse geschieht wie bei den massiven Polen, nur spielen hier die Widerstände der Querverbindungen, die oben vernachlässigt wurden, die Hauptrolle; l ist einfach die Blechdicke s. Unterteilungen senkrecht zur Achse, die gröber sind als $n a$, sind von geringem Wert. Wird $s < n a$, so werden die Wirbelstromverluste in rascherem Tempo kleiner als s.

Um die Wirbelströme in den Endscheiben der Anker zu verringern, ist es ratsam, den Anker etwas länger zu bauen als das Feldgestell und eventuell für diese Scheiben ein Material zu verwenden, das unmagnetisch und von grossem Widerstandskoeffizienten ist, z. B. Manganstahl. Gewöhnlich vermindert allerdings schon die magnetische Schirmwirkung bezw. die Selbst- § 163. Wirbelströme in den Endscheiben und Bolzen.

induktion das Auftreten nennenswerter Wirbelströme in den dicken Endscheiben. Steinmetz bringt zur Verminderung der Wirbelströme im feststehenden Joch der Induktortype zwischen dem geblätterten Teil, der dem rotierenden Kreuz gegenübersteht, und dem massiven Joch einen Hilfszwischenraum an und legt überdies an diese Stelle zur Dämpfung eine Käfigwicklung.

Auch in den Bolzen, welche die Ankerbleche zusammenhalten, entstehen Wirbelströme. Die Bolzen wirken überdies, wenn sie nicht isoliert werden, wie ein Kurzschlussanker, in dem nennenswerte Arbeitsbeträge in Stromwärme umgesetzt werden können. Diese Ströme in den Bolzen wirken noch dadurch schädlich, dass sie die Kraftlinien von den Ankerteilen jenseits der Bolzen abdrängen, da sie Gegenwindungen darstellen, die wegen der grossen Selbstinduktion der Bolzen gegen die elektromotorische Kraft nahezu um 90° nacheilen, also direkt den äusseren Ampèrewindungen entgegenwirken. Die Induktion im Anker wird durch dieses Abdrängen wesentlich gesteigert. Bolzen sind deshalb möglichst dem Umfange zu nähern, wenn es nicht möglich ist, sie ganz ausserhalb unterzubringen oder nur zur Hälfte in die Bleche hereinragen zu lassen.

Um die Hysteresisverluste in den Ankerblechen niedrig zu halten, sind dieselben sorgfältig auszuwählen und es sind nur die magnetisch besten Sorten zu verwenden. Es ist sehr vorteilhaft, die fertig zusammengestellten, abgedrehten Bleche noch einmal vorsichtig auszuglühen.

49. Reibungsverluste.

§ 163. Lagerreibung.

Die Lagerreibung ist eine sehr variable und schwer genau bestimmbare Grösse, sie hängt von dem Zustand des Lagers, vom Lageröl und von der Lagertemperatur ab. G. Dettmar hat in E. T. Z. 1899 auf Grund zahlreicher Versuche Formeln für die Lagerreibung angegeben, die sehr gute Resultate geben. Solange der spezifische Lagerdruck kleiner als 30 bis 44 kg bleibt, ist die Lagerreibungsarbeit in Watt

$$49{,}05\, r \cdot d \cdot l \cdot \sqrt{w^3} \quad \dots\dots\dots \quad (80)$$

(d Zapfendurchmesser, l Zapfenlänge in Centimeter, w Wellengeschwindigkeit in Meter); r ist etwa 0,015. Nach den Erfahrungen des Verfassers kann man statt 49,05 r setzen: 0,5 bis 0,8.

In Abhängigkeit der umgebenden Temperatur T_a findet sich für die Lagerreibungsarbeit in Watt

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{-T_a + \sqrt{T_a^2 + 62{,}45\, u s \sqrt{w^2}}}{0{,}637\, u}\, d \cdot l. \\ u = 25,\ s = 0{,}53. \end{array}\right\} \quad \dots\dots \quad (81)$$

Versuche ergaben $u = 25$, $s = 0{,}53$.

Es ist ferner zu beachten, dass es keine zusätzliche Reibung giebt, solange der spezifische Lagerdruck kleiner als 30 bis 44 kg bleibt, so dass verschiedener Riemenzug und magnetischer Zug, wenn sie nicht übermässig sind, von geringem Einflusse bleiben. Es ist allerdings möglich, dass magnetische Züge, die aber schwer im voraus zu berechnen sind, da sie von der Genauigkeit der Ausführung und von der Abnutzung abhängen, den Lagerdruck um 50 und mehr Proc. vermehren.

Die Luftreibung ist nur bei sehr rasch laufenden Maschinen und solchen mit besonderen Kühlvorrichtungen bedeutend. Sie kann an Hand der Theorien für Ventilatoren berechnet werden. § 164. Luftreibung.

Die procentuelle Reibungsarbeit einer Maschine nimmt mit zunehmender Maschinenleistung ab: Fig. 335 nach R. Braun E. T. Z. 1899; die Abscissen bezeichnen die Normalleistung in PS.

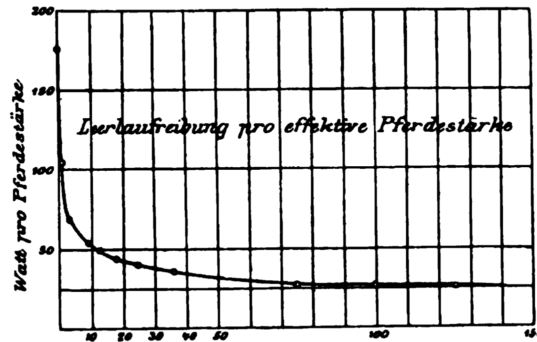


Fig. 335.

Die Reibungsverluste der Bürsten auf den Schleifringen oder auf dem Kommutator der Erregermaschine sind in Watt § 165. Bürstenreibung.

$$9{,}81\, f \cdot p \cdot Q \cdot v, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (82)$$

wobei v die Umfangsgeschwindigkeit in Meter, Q der gesamte Bürstenquerschnitt in Quadratcentimeter, p der spezifische Auflagedruck der Bürsten (0,050 bis 0,200 kg pro qcm) ist und f, der Reibungskoeffizient, für Metall- und Kohlenbürsten etwa von 0,1 bis 0,5 schwankt. Der Reibungskoeffizient kann für Metallbürsten grösser sein als für Kohlenbürsten.

50. Wirkungsgrad.

Der totale Wirkungsgrad einer Wechselstrommaschine ist:

$$\eta = \frac{p'\, J E_k \cos\varphi}{p' J^2 w + J_n^2 w_n + A_{H+W} + A_r + p' J E_k \cos\varphi} \quad . \quad . \qquad (83)$$

Die Verluste in der Ankerwicklung, Erregerwicklung, im Eisen und durch Reibung sind im vorigen Abschnitt behandelt. § 166. Zusammensetzung des Wirkungsgrades.

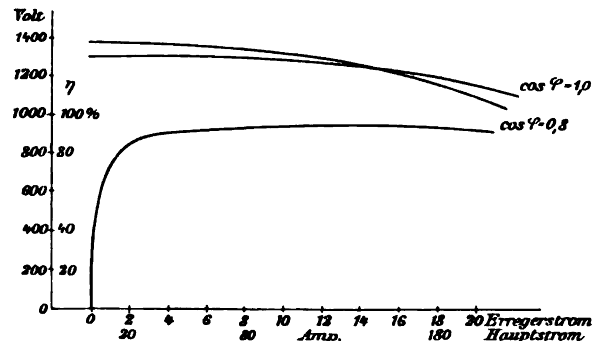


Fig. 336.

Sitzt die Erregermaschine direkt auf der Generatorwelle oder ist sie sonstwie direkt mit dem Generator verbunden, so kann man zu dem Erregereffekt $J_n^2 w_n$ den Gesamtarbeitsaufwand für die Erregermaschine schlagen, um den Wirkungsgrad samt Erregermaschine zu erhalten. In Fig. 336 ist

§ 167. Übliche Wirkungsgrade.

der Wirkungsgrad eines Drehstromgenerators gezeichnet und zwar einschliesslich des ganzen Erregereffektes. Die Kurve erreicht den für eine Maschine

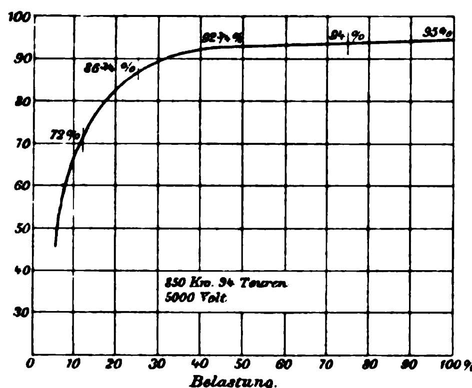


Fig. 337.

von 200 bis 300 KW sehr hohen Wert von 95 Proc. Es ist möglichst anzustreben, dass der Wirkungsgrad auch bei halber Last und geringeren Belastungen noch bedeutend ist. Der Wirkungsgrad der 850 KW-Maschinen der Central London Railway verläuft nach Fig. 337 (General Electric Co.).

Die einzelnen Verluste, die zusammen den Wirkungsgrad bestimmen, setzen sich bei den üblichen, dreiphasigen Wechselstrommaschinen etwa folgendermassen zusammen:

	30 KW %	100 KW %	500 KW %
In den Ankerleitern	2—4	1½—3	1—1½
In der Erregung .	1½—4	1—2½	½—1½
Im Eisen	2—4	1½—3	1—2
Reibung	2—4	1½—3	½—1½

Der höchste Wirkungsgrad, der sich in den industriell üblichen Maschinen erreichen lässt, scheint 97 Proc. zu sein.

51. Erwärmung und Ventilation.

§ 168. Übertemperatur in Abhängigkeit der Zeit.

Die Übertemperatur, die irgend ein Maschinenteil über die umgebende Temperatur annimmt, hängt ab von dem in demselben in Wärme umgesetzten Effekt, von der ausstrahlenden Oberfläche und zwar von deren Grösse und Ausstrahlungskoeffizienten und von der Geschwindigkeit, mit der der betreffende Maschinenteil durch die Luft bewegt wird, bezw. mit der die Luft an demselben vorbeibewegt wird. Die Abhängigkeit der Temperaturerhöhung von der Zeit ist in Fig. 338 dargestellt. Diese Kurve lässt sich darstellen durch:

$$T = \frac{A_v}{\gamma \lambda S}\left(1 - \varepsilon^{-\frac{\lambda S}{s G} t}\right), \quad \ldots\ldots \quad (84)$$

wenn A_v die Wattverluste, t die Zeit, $\gamma = \frac{1}{4200}$, s die spezifische Wärme, λ Wärmeabgabekoeffizient, S die Oberfläche in Quadratcentimeter, G das Gewicht, $\varepsilon = 2{,}7183$ ist. Kleinere Maschinen erreichen ihre stationäre Temperatur schon nach wenigen Stunden, grosse jedoch unter Umständen erst nach 12 bis 20 Stunden.

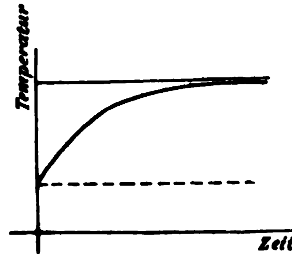


Fig. 338.

§ 169. Berechnung der Übertemperatur.

Ist S die abkühlende Oberfläche, A_v der Wattverlust und v die Geschwindigkeit des Maschinenteils oder der vorbeistreichenden Luft, so wird im allgemeinen die Übertemperatur bei Dauerbetrieb für praktische Zwecke dargestellt durch

$$T = \frac{C \cdot A_v}{S(1 + 0{,}1\, v)}. \quad \ldots\ldots \quad (85)$$

Die Konstante C hat für Anker nicht besonders ventilierter Maschinen nach Versuchen des Verfassers den Wert 250—350. Dieser Wert gilt sachgemäss für alle Fälle, Spulen und Kollektoren etc. Bei stillstehenden Spulen ($v = 0$) ist C zu ersetzen durch

$$C(1 + 0{,}15\, s),$$

wobei s die Wickeldicke in Centimeter ist.

Bei rotierenden Ankern ist in die obigen Formeln für die ausstrahlende Oberfläche S einzusetzen: Der äussere Cylinder ganz, die Seitenflächen[1]) zu $^1/_4$ und die innere Cylinderfläche, wenn dieselbe überhaupt freiliegt, zu $^1/_4$. Jede Oberfläche ist direkt mit ihrem mittleren $0{,}1\, v$ zu multiplizieren. Als A_v sind nur die Verluste, die thatsächlich im Anker auftreten, einzusetzen, diejenigen der Endverbindungen etc. sind abzuziehen. Bei Magnetspulen ist die äussere Spulenoberfläche ganz, die beiden Flantschen und die innere Oberfläche je zu $^1/_4$ einzusetzen. Für Kollektoren und Schleifringe ist zu berücksichtigen, dass die ganze Wärme direkt auf der Oberfläche erzeugt wird, so dass die Ausstrahlung einfacher erfolgt als bei Ankern und Spulen, C hat also nur den halben Wert: 130—170.

Für ventilierte Anker ist C unter Umständen nur die Hälfte. Kapp giebt für die Koeffizienten den Wert 550 an, der aber bei der oben genannten Berücksichtigung der Flächen zu gross ist.

Eine andere Beziehung nach Esson lautet:

$$\frac{645\, A_v}{S(1 + 0{,}3\sqrt{v})}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (86)$$

1) Es können natürlich nur freiliegende Oberflächen in Frage kommen.

Der Wert C ist übrigens abhängig von T selbst, je höher T, desto besser kühlt die Fläche, da das Temperaturgefälle zunimmt, d. h. desto kleiner wird C. — T ist auch schon in Abhängigkeit des Gewichtes statt der Fläche S ausgedrückt worden.

§ 170. Einfluss der Geschwindigkeit auf die Kühlung. Der Einfluss der Geschwindigkeit ist in den Figg. 339—341 niedergelegt. Die erste gilt für die stillstehenden Magnetspulen, innerhalb welcher einmal eine Armatur mit etwa 10 m Umfassungsgeschwindigkeit rotiert: Kurve 1. Steht der Anker still, so gilt die obere Kurve 2. Durch Widerstandsmessung ergaben sich die Temperaturen 37° und 47°. Das Verhalten des Ankers selber ist in Fig. 340 u. 341 gegeben. Die Fig. 340 gilt für

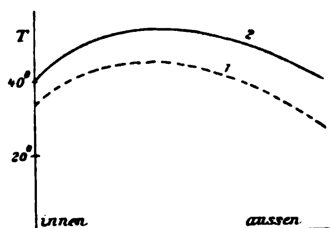


Fig. 339.

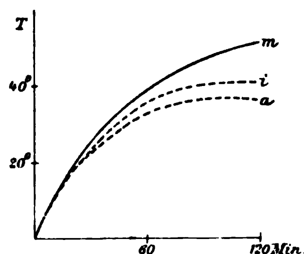


Fig. 340.

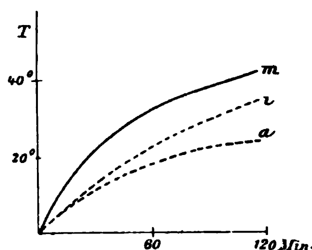


Fig. 341.

Stillstand, die Fig. 341 für 10 m Umfangsgeschwindigkeit. Die Messungen sind an verschiedenen Stellen des Ankers durch Thermoelemente angestellt (i = Innenseite des Ankers, a = Aussenseite, m = Mitte des Ankers.) (Parshal & Hobart.)

In El. World 1897, p. 12 wird die maximale Temperatur T_{max} im Innern einer Magnetspule dargestellt durch

$$T_{max} = T_r + 0 \cdot 0000445\, \delta^2 \cdot D$$

worin T_r die Temperatur am Rande, δ die Stromdichte auf den Quadratzoll bezogen und D die Wickeltiefe in Zoll ist.

§ 171. Dimensionierung mit Rücksicht auf Erwärmung. Die Induktionen, die es ermöglichen, die Eisenverluste und die Eisenerwärmung mässig zu halten, stehen in Kapitel 48. Für die Stromdichte in den Ankerleitern ergeben sich bei grossen Maschinen Werte zwischen 2,0 und 3,0, bei kleineren und solchen ohne Eisen bis 5 Ampère pro Quadratmillimeter und mehr. In der Erregerwicklung sollte die Stromdichte etwa zwischen 1,0 und 1,5 schwanken, sofern es sich um grosse Maschinen handelt; bei kleineren trifft man Werte bis 3 Ampère pro Quadratmillimeter; die grossen gemeinsamen Erregerspulen sollten eher mit weniger als 1 Ampère pro Quadratmillimeter beansprucht werden.

Die Stromdichte an Schleifringen kann immerhin 50—80 Ampère pro Quadratcentimeter Metallbürste betragen, bei Kollektoren höchstens die Hälfte,

für Kohle auf Schleifringen sind 10 bis 20 Ampère zulässig, bei Kollektoren höchstens die Hälfte.

Da Erregerspulen im Inneren heisser werden als aussen und durch diese Erwärmung im Innern mit der Zeit eine Verkohlung des Isolationsmaterials eintreten kann, so ist es ratsam, mit der Wickeltiefe nicht über 40 bis 50 mm zu gehen.

Für die Temperaturzunahme der Lager lässt sich nach DETTMAR setzen: § 172. Lagertemperatur.

$$T = \frac{-T_a + \sqrt{T_a^2 + 62{,}45\, u\, s \sqrt{w^3}}}{2}, \quad \ldots \ldots \quad (87)$$

wenn T_a die Aussentemperatur, w die Wellengeschwindigkeit in Metern und für die üblichen Lagerdrucke $u = 25$, $s = 0{,}53$ ist.

Zur Erzielung guter Kühlung sind folgende Gesichtspunkte zu beachten: § 173. Erzielung guter Kühlung.
Der vorhandene Temperaturunterschied ist möglichst auszunutzen, d. h. es

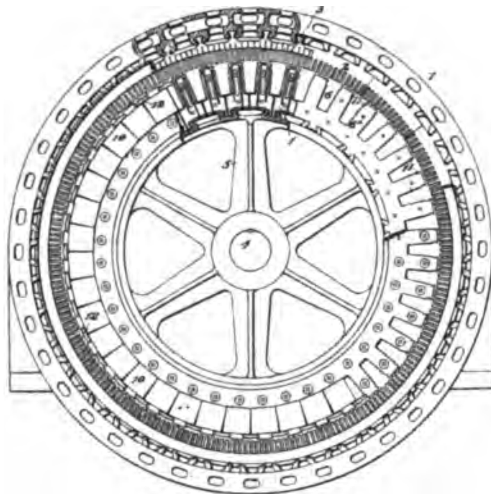


Fig. 342.

muss der Luft Gelegenheit zum Abfliessen gegeben werden; Luftstagnation und Luftsäcke sind zu vermeiden. Die frische Luft soll zunächst die kühleren und dann die heisseren Flächen bestreichen. Da die Temperatur im Inneren der Eisenkörper und Wicklungen höher ist als aussen, sollte man dieselben unterteilen bezw. möglichst wenig tief halten. Vertikale Flächen kühlen bei gleichem Temperaturunterschied besser als horizontale, überhaupt muss die durch den Temperaturunterschied erzeugte Geschwindigkeit richtig geführt werden. Die sekundliche Luftgeschwindigkeit ist möglichst gross zu halten, ebenso die bewegte Luftmenge. Die Ventilationskanäle sind dem Luftlauf entsprechend günstig zu dimensionieren. Die Luft ist derart auf die Flächen zu leiten, dass der Wärmeaustausch ein inniger ist. Wicklungen und vorspringende Teile sind so anzuordnen, dass die Centrifugalkraft gross und alles möglichst luftig wird. Die Form der Arme ist bei rotierenden Teilen sehr von Einfluss. Für die Temperatur der Maschine ist natürlich auch die Jahreszeit, das Klima, das Lokal etc. von Bedeutung.

Fig. 342 u. 343 zeigt eine grosse Wechselstrommaschine Patent LAMME § 174. Beispiele von ventilierten Maschinen.
U. S. P. 633 857 mit Ventilationskanälen im rotierenden Feldgestell und im

Anker. Die Konstruktion der Distanzstücke für die Ventilationskanäle ist deutlich ersichtlich. In Fig. 344—346 ist nach U. S. P. 633858 die Ventilation einer Erregerspule gezeichnet. Es sind Kanäle in der achsialen und in der radialen Richtung angeordnet. Die Spule ist in viele einzelne Lagen (Fig. 346) mit Luftzwischenräumen eingeteilt. In dem D. R. P. 103236 werden in Abständen zwischen die Ankerbleche Platten C (Fig. 347) gelegt, welche durch Pressen oder Stanzen hergestellte Erhöhungen besitzen, wodurch Luftkanäle entstehen. Die Zähne der Platten C werden zur Stütze der Ankerblechzähne verdreht.

Die Ventilationsnuten werden zweckmässig in grosser, möglichst ungerader Anzahl bei geringer Breite angebracht. Sie vermindern dann zu-

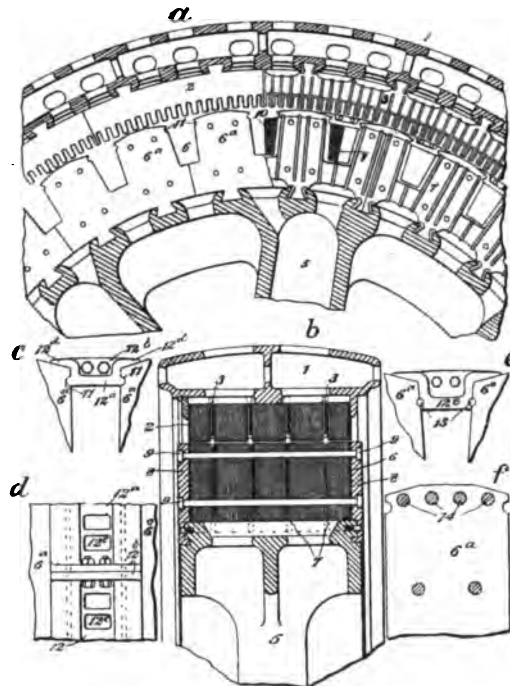


Fig. 343.

gleich die Wirbelströme, obwohl in anderer Hinsicht wieder ein seitlicher Kraftlinienfluss zu fürchten ist, der auf der Fläche der Endscheiben Wirbelströme induziert.

Bei kleineren Ankern, die keine Armsterne haben, werden die Ankerbleche mit achsialen Luftröhren[1]) L versehen (Fig. 348, D. R. P. 103344 von Siemens & Halske). Diese Maschine hat an beiden Seiten Leitbleche, um die Luft in richtiger Weise zu führen. Die Stirnverbindungen der rotierenden Wicklung werden direkt als Ventilatorschaufel benutzt. Namentlich die Seitenwicklung (Fig. 189) eignet sich sehr zur Ventilatorwirkung. Scheibenanker können leicht mit Flügeln ausgerüstet werden. Die rotierenden Pole wirken an sich als Schaufeln. In Ausnahmefällen sind wohl auch direkt Ventilatoren auf die Maschinenachse gesetzt worden.

1) Die Luftlöcher können auch direkt an die Achse stossen, also annähernd wie Keilnuten ausgebildet sein.

Die Erwärmung der Magnetspulen sollte im allgemeinen bei Dauerbetrieb nicht grösser sein als $T = 40$ bis 45^{0} C. über Aussentemperatur im Mittel, d. h. durch Widerstandsänderung gemessen: § 175. Zulässige Übertemperatur.

$$T = \frac{w_T - w_0}{w_0 \cdot a},$$

wobei a der Temperaturkoeffizient von Kupfer = 0,0037—0,0040 ist.

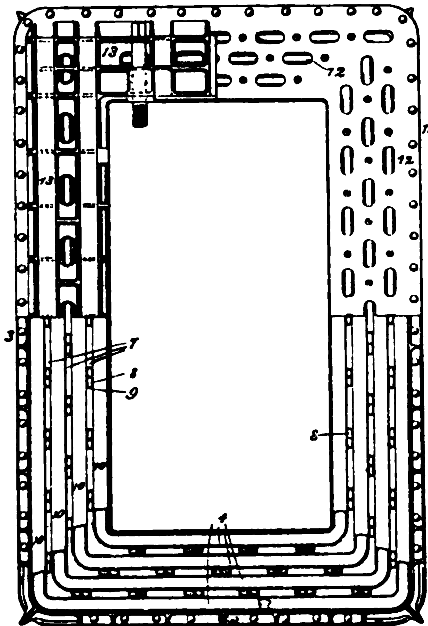


Fig. 344.

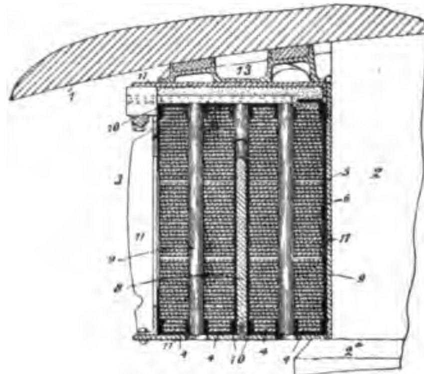


Fig. 345.

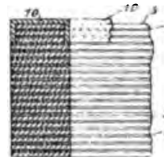


Fig. 346.

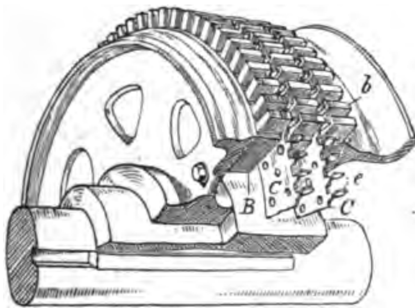


Fig. 347.

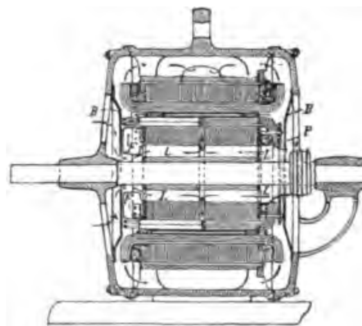


Fig. 348.

Für die Ankerwicklung kleinerer Maschinen sind noch 50^{0} Übertemperatur zulässig, für grosse Maschinen sollte 40^{0} die oberste Grenze für die Übertemperatur bei Dauerbetrieb sein. Das Eisen könnte, soweit es die Spulen nicht in Mitleidenschaft zieht, 60 und mehr Grad über Aussentemperatur annehmen. Für Wicklungen ist nämlich eine grosse Erwärmung des Isolationswiderstandes halber nicht angängig. In Fig. 349 ist z. B. der Isolations-

widerstand für verschiedene Temperaturen eingezeichnet, woraus zur Genüge die Verminderung derselben bei steigender Temperatur hervorgeht.

Bis zu einem gewissen Grade ist die Erwärmung der Wicklungen ganz zweckmässig, da sie die Isolation trocken hält.

Nutenanker kühlen im allgemeinen schlechter als glatte. Flachringanker kühlen gut, überhaupt schmale Anker. Es ist z. B. zweckmässig, vierpolige

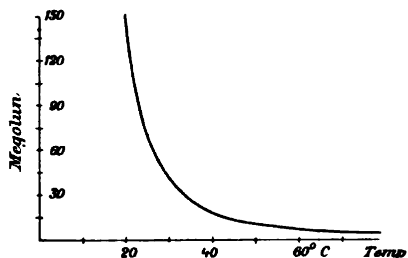


Fig. 349.

Maschinen mit einem Verhältnis von Länge : Durchmesser zu bauen, das kleiner ist als 0,7, bei sechspoligen kleiner als 0,5, bei achtpoligen kleiner als 0,4 etc. Bei grossen Maschinen bewegt sich die Breite am besten zwischen 150 und höchstens 500 mm (möglichst $\leqq$ 300). Für gute Kühlung ist ein grosser Luftzwischenraum und eine geringe Polbreite in der Umfangrichtung günstig.

52. Vergleich der verschiedenen Wechselstrommaschinen.

§ 176. Einphasenmaschine. Die einphasige Wechselstrommaschine, die vor 1889 einzig und allein in Frage kam, wird neuerdings nur noch für Netze mit ausschliesslicher Lichtabgabe benützt. Für diesen Fall ist das äusserst einfache Leitungsnetz überhaupt der Umstand, dass nur zwei Leitungen erforderlich sind, ein beträchtlicher Vorteil. Bei Beleuchtungsanlagen spricht auch die einfache Spannungsregulierung zu Gunsten des Einphasenstromes, indem die Konstanthaltung der Spannungen der verschiedenen Phasen bei ungleicher Belastung häufig unmöglich, zum mindesten kompliziert ist. Sobald Netze mit zahlreichen Motoren vorliegen oder es sich um lange Kraftübertragungen handelt, sind jedoch nur Mehrphasenmaschinen zu empfehlen, die indes schon ganz allgemein, also auch in Beleuchtungsnetzen in ökonomischer Hinsicht viel vorteilhafter sind als einphasige. Wickelt[1]) man auf ein gegebenes Maschinengestell 2/3 einer Dreiphasenwicklung für Einphasenabgabe, indem man z. B. wie in Fig. 175 immer eine Nute leer lässt, so bedingt ein Vollwickeln des ganzen Gestells für einphasige Stromabgabe eine Spannungserhöhung von nur ca. 15 Proc., trotzdem noch 50 Proc. Draht zugewickelt wurde. Es hat dies seinen Grund in der Zusammensetzung der einzelnen elektromotorischen Kräfte, deren Richtung von 0 bis 180° wechselt. Es lässt sich dies auch folgendermassen zeigen: Eine Phase habe die Spannung E, zwei hintereinander liefern dann die Spannung 1,73 E und drei hintereinander

1) GÖRGES, E. T. Z. 1895.

(Fig. 125) nur 2 *E*. Wickelt man ein gegebenes Dreiphasengestell zu 2/3 voll und lässt man den gleichen Wattverlust im Kupfer, also die gleiche Erwärmung zu, so leistet die Einphasenmaschine $\frac{\sqrt{1,5}}{1,73}$ d. h. ca. 71 Proc. der Mehrphasenleistung. Es ist deswegen ganz allgemein, dass ein gegebenes Maschinengestell als einphasige Maschine nur 55 bis 75 Proc. einer Dreiphasenmaschine leistet, allerdings unter Aufwand von etwas weniger Ankerkupfer, aber das gesamte Eisen- und Erregermaterial bleibt dasselbe.

Der Wirkungsgrad der Einphasenmaschine ist gewöhnlich geringer. Da bei gleicher Leistung der Ankerstrom einer Wechselstrommaschine im Verhältnis $1 : 1/\sqrt{3}$ grösser ist als in einer Dreiphasenmaschine, so ist die Ankerrückwirkung und die Streuung für die einphasige Type wesentlich grösser. Die Streulinien wachsen ziemlich direkt mit dem Strom; die Ankerrückwirkungen verhalten sich nach Früherem wie

$$\sqrt{3}\,\frac{2}{\pi} : 0,578 \cdot 1,5 = 1,28.$$

Bezüglich des Leitungsnetzes lässt sich nachweisen, dass bei Dreiphasenströmen, gleichen $\cos\varphi$ vorausgesetzt, nur 75 Proc. des Kupfers vom Wechselstromnetze nötig ist und bei Verwendung des neutralen Leiters vom Verkettungspunkt aus nur 29 Proc.; gleiche Leistung, gleiche Verluste und gleiche Gebrauchsspannungen vorausgesetzt. Die einphasigen Motoren halten in keiner Hinsicht einen für sie günstigen Vergleich mit den Drehstrommotoren aus. Zu Ungunsten der Mehrphasensysteme spricht also nur die Notwendigkeit drei oder vier Leitungen und entsprechend vielfaches Leitungs- und Schaltmaterial verwenden zu müssen, die Schwierigkeit, die Stromverbraucher in mehreren Zweigen richtig gleichmässig zu verteilen und die Spannung in den einzelnen Zweigen konstant zu halten, obwohl Motoren, die alle Phasen in gleicher Weise belasten, stets ausgleichend wirken.

§ 177. Zwei- und Dreiphasenmaschinen.

Ein Vergleich der verschiedenen Mehrphasenwicklungen zeigt, dass die Ausgiebigkeit (S. 77) um so grösser ist, je mehr es Phasen sind; und zwar für zweiphasig: dreiphasig: ∞ phasig $= 90 : 95 : 100$. Eine Zweiphasenmaschine erheischt also etwas mehr Kupfer als eine dreiphasige. Da jedoch der Ankerstrom bei gleicher Leistung für Dreiphasenwicklungen im Verhältnis 57,8 : 50 grösser ist als bei Zweiphasenwicklungen, so ist die Ankerrückwirkung der letzteren Type etwas kleiner. Dreiphasen- und Zweiphasenmaschinen sind also an sich ziemlich gleichwertig. Ein mechanischer Vorteil der Zweiphasenmaschine ist der, dass die Wicklung häufig einfacher herzustellen ist, namentlich für Hochspannungsmaschinen; z. B. wenn es sich um Induktionsgeneratoren mit doppeltem Anker handelt, so kann man einen Anker mit seiner Phase vollwickeln und den anderen mit der zweiten. Eine unabhängige Regulierung der verschiedenen Phasen ist bei zwei Phasen, die allerdings unverkettet und getrennt liegen müssen, leichter möglich als bei drei Phasen. Zur Übertragung auf grosse Entfernungen eignet sich jedoch jedenfalls dreiphasiger Wechselstrom wesentlich besser als zweiphasiger; die Leitungsverluste, der Ohm'sche und der induktive Leitungsabfall, sind bedeutend geringer. Auch die Leitungsmaterialen ausser dem Draht sind bei drei Leitungen billiger als bei vier.

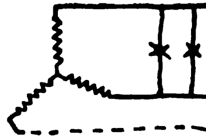
Eine Kombination beider Systeme in der Art, dass auf den Maschinen zwei aufeinander senkrecht stehende Wicklungen angebracht werden, deren

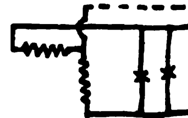
Windungszahlen sich wie 1 : 0,866 verhalten, und dass die Zweiphasenströme zur Übertragung in ruhenden Transformatoren, die zugleich in die Höhe transformieren, in Dreiphasenströme umgesetzt werden, findet sich z. B. bei den grossen Niagaraübertragungen (SCOTT).

BLONDEL fand allerdings, dass eine Zweiphasenmaschine bei Belastungsänderungen von Null auf Voll in einem Zweige, im andern eine Spannungsänderung von 10 Proc. zeigte. Er giebt ferner an, dass eine Zweiphasenmaschine mit zwei Nuten pro Pol und Phase mehr obere harmonische Glieder in der Spannungskurve zeigt als eine dreiphasige und dann giebt er den einfachen, dreiphasigen Transformatoren mit drei Schenkeln den Vorzug, namentlich weil sie auch billiger sind als zweiphasige.

§ 178. Kombination von Ein- und Mehrphasensystemen.

Für Netze mit vorwiegendem Lichtbetrieb sind verschiedene Kombinationen zwischen Ein- und Mehrphasensystemen ausgeführt worden. Am nächsten liegt es die Beleuchtung in eine Phase bezw. zwischen zwei Leitungen eines Mehrphasennetzes zu legen und in diesem Zweig auf konstante Spannung zu regulieren, unabhängig von den übrigbleibenden Phasen,


Fig. 350.


Fig. 351.

die nur für Motoren beigezogen werden, siehe Fig. 350 (dreiphasig) und Fig. 351 (zweiphasig). Das monocyklische System ist bereits früher besprochen. Für Dreiphasenströme ist bei verschiedener Belastung in den einzelnen Zweigen die Spannungsregulierung eine bessere, wenn Generatoren und Stromverbraucher in Dreieck geschaltet sind. Es sind zum Spannungsausgleich auch sogenannte Ausgleichstransformatoren verwendet worden, die je pro Phase einspulig gewickelt sind. Es lassen sich auch gewöhnliche Dreiphasentransformatoren, die zur Spannungsreduktion sowieso erforderlich sind, so schalten, dass sekundär Einphasenstrom entnommen werden kann (GRASSI), wobei die verschiedenen primären Phasen stets gleich belastet bleiben.

§ 179. Gleichpoltype.

Die Induktionsgleichpoltype hat die grosse Beliebtheit, die ihr vor einigen Jahren noch anhaftete, grösstenteils wieder eingebüsst, obwohl sie in besonderen Fällen noch volle Berechtigung hat, da es ihr unbestrittener Vorteil ist, dass alle Wicklungen stillstehen und nur ein Stahlrad rotiert. Aber die magnetische Ausnützung der Maschine ist wegen der halben cyklischen Magnetisierung schlecht, die Streuung ist der hohen Sättigungen und der grossen Streuflächen halber sehr gross, auch die Streuung in umgebende Eisenmassen. Die grosse Erregerspule bietet bei grossen Maschinen bedeutende Herstellungs- und Transportschwierigkeiten. Die Maschinen liefern häufig unsymmetrische Spannungskurven mit $\sin 2\omega t$, $\sin 4\omega t$ etc., was für das Parallelschalten verhängnisvoll werden kann. Bei gleicher Tourenzahl und Umfangsgeschwindigkeit werden sie schwerer und teurer als die Wechselpoltype.

Auch die Lüftung und Zugänglichkeit der Spulen ist bei letzterer Type günstiger und bei gleicher Verschiedenheit des Luftspaltes am Umfang der

magnetische Zug geringer; letzteres wegen der geringeren absoluten Induktion und des grösseren Luftzwischenraumes an sich.

Nur bei hohen Tourenzahlen und grossen Umfangsgeschwindigkeiten (über 50 m) sollte die Gleichpoltype in Betracht gezogen werden.

53. Leistung der Wechselstrommaschinen in Abhängigkeit der Dimensionen.

Vergrössert man sämtliche linearen Grössen einer Maschine auf das m-fache, so leistet dieselbe im allgemeinen nicht m^3-mal mehr, sondern m^x-mal mehr, wobei x um den Wert 2,5 bis 3,5 schwankt. Vorausgesetzt ist dabei, dass die Umfangsgeschwindigkeit dieselbe bleibt, also die Umdrehungszahl mit zunehmender Leistung abnimmt. Die Leistung wächst also langsamer als das Gewicht. Das Gewicht der üblichen Mehrphasengeneratoren schwankt zwischen 30 und 100 kg pro KW, ohne Rücksicht auf die Touren. Rechnet § 180. Leistung u. Gewicht.

Fig. 352.

Fig. 353.

man verschieden grosse Mehrphasengeneratoren auf gleiche Touren um, so findet man für 30 bis 50 KW-Maschinen 20 bis 40 kg pro KW und 1000 Touren. Der Wert fällt bei grossen Generatoren von 1000 KW bis auf 3 herunter. Für Einphasengeneratoren gelten um 30 Proc. grössere Werte.

Wilson nennt den Quotienten Voltampère: Minutliche Umdrehungen, „Massenfaktor“. Bei wachsendem Massenfaktor nimmt das Gewicht und auch der Preis anfangs ziemlich schnell zu, nachher steigt das Verhältnis geradlinig an. Während sich Mehrphasenmaschinen bis zu einem Massenfaktor 100 annähernd wie Gleichstrommaschinen verhalten, werden grössere Modelle schwerer. Ein direkter Vergleich von Gleich- und Wechselstrommaschinen ist in mancher Hinsicht schwierig, da Wechselstrommaschinen bezüglich Umfangsgeschwindigkeit, Durchmesser, Rückwirkung, Polzahl etc. anders entworfen werden als Gleichstrommaschinen. Schon vor Jahren hat Esson dies an den vergleichenden Figuren 352 u. 353 auseinandergesetzt: erstere ist eine Gleichstrommaschine und letztere die ihr entsprechende Wechselstrommaschine, gleicher Leistung und Tourenzahl.

Überschlägig lässt sich die Leistung A einer Wechselstrommaschine in KW setzen § 181. Leistung in Abhängigkeit von

$$A = C \cdot d^2 l u \cdot 10^{-6} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (88)$$

Durchmesser und Länge.

d, l sind Durchmesser und Länge in cm, u ist die Umdrehungszahl pro Minute, C schwankt bei Mehrphasenmaschinen über 50 KW etwa zwischen 0,5 und 1,5. C wird mit grösser werdendem Durchmesser etwas grösser. Der Wert steigt mit der Luftinduktion und mit dem als zulässig erachteten Spannungsabfall.

Eine wirkliche Konstante erhält man eher, falls man setzt:

$$A = C' \cdot (d^2\, l)^{1,2}\, u \cdot 10^{-7}, \quad \ldots \ldots \quad (89)$$

wobei

$$C' = \sim 1,0.$$

Kapp ersetzt die erstgenannte Beziehung durch

$$A = C_1 \cdot Q v p. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (90)$$

Dabei ist Q die Polfläche in qcm, v die Umfangsgeschwindigkeit in m pro Sekunde, p die Polpaarzahl. Der Koeffizient C_1 wird für Mehrphasenmaschinen zu 0,7 bis 1,1 bei Wechselpolen und zu 1,0 bis 1,6 bei Gleichpolen angegeben, und zwar für die üblichen 50 Perioden. Diese Werte sind jedoch bei der heutigen scharfen Konkurrenz zu niedrig gegriffen.

Parshal hat für den Durchmesser in cm von Wechselstrommaschinen die Beziehung gegeben

$$d = 75 + \frac{A}{2} + \frac{2500}{E_k}$$

E_k ist die Klemmenspannung.

F. Antrieb und Schaltung der Wechselstrommaschinen.

54. Antrieb der Wechselstrommaschinen.

§ 182. Antriebsmaschinen.

Die Wechselstrommaschinen werden von Dampfmaschinen, Gasmotoren oder Wassermotoren (Turbinen oder Wasserrädern) vermittelst Riemen- oder Seilübertragung[1]) oder Zahnradübersetzung oder auch unter Verwendung direkter Kupplung angetrieben. Riemenantrieb ist bis etwa 100 KW üblich, von da ab setzt Seilantrieb bis 200 bezw. 400 KW ein; grössere Maschinen werden meist direkt gekuppelt. Bei Riemenantrieb wird für kleinere Modelle eine fliegende Riemscheibe angeordnet und die Maschine erhält zwei Lager. Grössere Modelle erhalten namentlich bei Seilantrieb drei Lager, zwei derselben fassen die Antriebsscheibe zwischen sich. Riemen erfordern eine Spannvorrichtung d. h. Gleitschienen, auf denen die Maschine durch Spindeln verschoben werden kann, bei Seilübertragung wird diese Spannvorrichtung kaum verwendet. Zahnradübersetzung, die am meisten für langsamlaufende Turbinen in Anwendung kommt, kann entweder mit Stirnrädern oder Winkelrädern bewerkstelligt werden. Letztere dienen dazu, die vertikale Achsdrehung in eine horizontale umzusetzen. Häufig werden jedoch neuerdings sogar noch bei 50 und weniger Touren die Dynamomaschinen

---

1) Die Riemenbreite in Centimeter berechnet sich aus $18\sqrt{\frac{PS}{v}}$, PS Pferdestärken, v Riemengeschwindigkeit in m ($v = 8 \div 25$ m); die Riemendicke in Centimeter $= \frac{1}{188}\sqrt{\frac{PS}{v}}$; wenn $\frac{PS}{v} > 6 \div 10$, wird Seil angewendet ($v = 12 - 25$ m), wobei $d^2 m = \gamma \frac{PS}{v}$, ($d$ Seildurchmesser in Centimeter, m Zahl der Hanfseile, $\gamma = 10$ bis 23), Scheibendurchmesser $D = 15 \div 30\,d$. Bei kleinen Maschinen ist die Übersetzung bis 1 : 8, bei grossen häufig nur 1 : 2.

Eine andere Beziehung giebt an, dass die Riemenbreite ist:

$$\frac{PS}{D^2 u} c_1 + c_2,$$

wobei D der Scheibendurchmesser in Meter, u die Umlaufzahl, $c_1 = 1{,}2$ bis 1,6 und c_2 eine Konstante ist, welche die Centrifugalkraft berücksichtigt. c_2 kann eine Verbreiterung bis 30 Proc. erheischen.

direkt auf die vertikale Turbinenwelle gesetzt, es ist dies die sogenannte Schirmtype (umbrella type). Bei direkter Kupplung mit Dampfmaschinen oder Gasmotoren sitzt die Wechselstrommaschine seitlich, eventuell rechts und links je eine, von der Antriebsmaschine, sofern es sich um stehende Maschinen handelt. Bei liegenden Verbundmaschinen setzt man die Dynamo häufig zwischen die beiden Kurbeln. Im letzten Falle .wird von der elektrotechnischen Fabrik die Dynamo ohne Lager und ohne Welle geliefert, während bei seitlicher Kupplung gewöhnlich wenigstens ein seitliches Stützlager eventuell auch die Welle mit halbem Kupplungsflantsch, bei kleinen Maschinen sogar zwei Lager mit halbem Kupplungsflantsch mit der Wechselstrommaschine zu liefern sind. — Die Tourenzahl der Dampfmaschine muss sich bei gegebener Periodenzahl n nach der Dynamo richten, es sind nur Tourenzahlen $\frac{60\,n}{p}$ anwendbar, wobei p, die Polpaarzahl, eine ganze Zahl sein muss.

§ 183. Anforderungen an die Antriebsmaschinen. Die Kraftmaschine hat nicht dem mittleren Verbrauch zu entsprechen, sondern muss je nach Grösse der Anlage mehr oder weniger anpassungsfähig sein. Auf die Erzielung höchsten Wirkungsgrades für bestimmte Leistung ist meist beim Entwurf der Dampfmaschine zu verzichten, dafür aber weit variierende Füllungen und ein in möglichst weiten Grenzen, mindestens zwischen halber und anderthalbfacher Belastung gleichmässig hochliegender Wirkungsgrad anzustreben; Hauptgewicht ist ferner aus sofort zu erörternden Gründen auf hohen Gleichförmigkeitsgrad[1]) zu legen. — Bei einer einphasigen Wechselstrommaschine schwankt die Arbeitsabgabe bei 50 Perioden 100 mal in der Sekunde von einem Maximum bis Null. Nach Blondel (Lum. El. Bd. 45) ist deshalb, falls $\omega_0 = \frac{2\pi n}{60}$ die mittlere Winkelgeschwindigkeit ausdrückt, die grösste auftretende Winkelgeschwindigkeit ω bestimmt aus der mittleren Arbeit A_m, dem Trägheitsmoment Θ und dem Phasenwinkel φ nach der Beziehung

$$\omega^2 - \omega_0^2 = \frac{A_m}{2\pi n \Theta \cos\varphi} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (91)$$

§ 184. Mehrcylindermaschinen. Es sind zur Erzielung gleichmässigen Ganges möglichst Mehrcylindermaschinen (Zwillingsmaschinen oder Maschinen mit zweistufiger Expansion) mit entsprechend versetzten Kurbeln zu verwenden. Zu weit darf jedoch in dieser Abstufung ja nicht gegangen werden, da schon dreistufige nicht selten sogar Compoundmaschinen zu langsam in der Regulierung und Anpassung an einen schwankenden Betrieb sind und zu Erschütterungen Veranlassung geben. Überdies ist meist auch das Material der Dreicylindermaschine theilweise schlecht ausgenützt, indem z. B. die Welle und die Kurbeln

1) Die Aufnahme der Kurve für die Geschwindigkeitsänderungen pro Umdrehung ist äusserst erwünscht. Man kann etwa einen Schreibstift mit gleichförmiger Geschwindigkeit längs einer auf der Maschinenwelle sitzenden Papiertrommel verschieben. Es lässt sich auch einfach die Integralkurve der augenblicklichen Geschwindigkeit bestimmen. Gleicht man die Spannung der Dynamo im Mittel durch eine Akkumulatorenbatterie ab, so geben die verbleibenden Stromschwankungen, die etwa durch ein Elektrodynamometer oder durch einen selbstthätigen Kurvenindikator (siehe R. Franke E. T. Z. 1899) zu messen sind, ein direktes Mass für die Ungleichförmigkeit. Die Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen liefert die einwurfsfreiste Methode, da keine Trägheitskräfte ins Spiel kommen. Häufig werden zur Aufnahme des Ungleichförmigkeitsgrades Stimmgabeln mit Russschreibern benutzt, die Genauigkeit ist jedoch gering. A. Aichele beschreibt E. T. Z. 1900, S. 263 einen einfachen Apparat, wobei ein Stift die Pendelungen der Achse gegenüber einem gleichförmig rotierenden Schwungrad aufzeichnet.

durchweg gleich stark gehalten werden, Masse, die nur für die der Dynamo zunächst liegenden Maschinenelemente erforderlich wären, da nur diese das ganze Moment zu führen haben. Bei abnormaler Füllung ist ihr Wirkungsgrad schlecht und die Anschaffung ist an sich teuer.

Das Schwungrad, das allerdings bei grösseren Maschinen zum Teil, aber § 185. Das Schwungrad.
gewöhnlich nur zum Teil, durch den rotierenden Anker bezw. das rotierende Schenkelkreuz der Dynamo ersetzt werden kann, ist sehr kräftig zu halten. Am besten ist es, das Schwungrad so nah als möglich an die Dynamo zu legen, damit die Maschinenwelle nicht durch Federung zu störenden Pendelungen Veranlassung giebt.

Es ist in Betracht zu ziehen, dass die Beanspruchungen, die ein Schwungrad gelegentlich auszuhalten hat, ganz beträchtlich sind. Moderne Drehstrommaschinen für Kraftverteilungszwecke werden mit so viel Kupfer und mit so feuersicherer Isolation ausgeführt, dass sie einen Kurzschluss ohne ernsthafte Gefährdung ertragen können, so dass es nicht ausgeschlossen ist, dass eine Maschine durch Überlast stillgesetzt oder durch Kurzschluss zum Durchgehen gebracht wird — eine Wechselstrommaschine wird bekanntlich bei Kurzschluss völlig entlastet, da $\cos \varphi = o$ wird. Dann kann es aber noch vorkommen, dass gerade, wenn das Schwungrad hält, die Überlast aufgehoben wird und die Maschine rasch wieder anläuft bezw. bei aufgehobenem Kurzschluss gebremst wird. Es ist indes ganz gut möglich Schwungräder zu bauen, die nach weniger als einer Umdrehung vollständig still gesetzt werden können. Die in Amerika hie und da verwendeten, zusammengesetzten Schwungräder aus Schmiedeisen sind in Bezug auf Aufnahme starker Spannungswechsel günstiger als die üblichen Konstruktionen. Raschlaufende Dampfmaschinen erfordern selbstverständlicherweise keine so schweren Schwungräder als langsamlaufende.

Ist $\delta = \frac{v_{max} - v_{min}}{v_{max} + v_{min}}$ die relative Geschwindigkeitsänderung einer Dampf- § 186. Ungleichförmigkeitsgrad.
maschine pro Umdrehung, so ist für Zweicylindermaschinen (Kurbelwinkel $\alpha = 180^0$) bei der ungünstigsten gegenseitigen Kurbelstellung die grösste Phasenverschiebung beider Maschinen bei Erzeugung von Wechselstrom $(45\,\delta p)^0$, und für Dreicylindermaschinen (Kurbelwinkel $\alpha = 120^0$) $(30\,\delta p)^0$ und allgemein bei beliebigem α : $\left(\frac{\alpha}{4}\,\delta p\right)^0$. Ausser der Polpaarzahl p ist also namentlich der Ungleichförmigkeitsgrad δ, der mit zunehmenden Schwungmassen abnimmt, klein zu halten, da bei der Überschreitung eines gewissen Höchstwerts jener Phasenschiebung die Maschinen ausser Tritt fallen. Bei einer achzigpoligen Maschine mit $\delta = {}^1/_{20}$ und zwei Cylindern wird die Verschiebung 90^0, die Maschine fällt aus dem Tritt. Der Ungleichförmigkeitsgrad bedingt, dass die Periodenlänge über den Umfang der Maschine schwankt. Für δ ist etwa ${}^1/_{200}$—${}^1/_{300}$ zu verlangen, bei Riemantrieb kann δ etwa die Hälfte sein. Gasmotoren sind in dieser Hinsicht sehr ungünstig, bei denselben ist jedenfalls die Tourenzahl nicht durch Aussetzer, sondern durch Änderung der Gasmischung zu bewerkstelligen.

Görges sagt E. T. Z. 1900, S. 193: Für das Verhalten der Maschinen beim Parallelbetrieb kommt es nicht so sehr auf den Ungleichförmigkeitsgrad der Maschine als vielmehr auf die grösste Vor- und Nacheilung an, die ein Punkt des rotierenden Teiles im Vergleich zu dem Orte annimmt, an dem er sich zu derselben Zeit bei gleichförmigem Gange befinden würde. Wie

gross der Ungleichförmigkeitsgrad sein darf, hängt ganz von den Bedingungen ab, unter denen die Antriebsmaschine arbeitet. Besitzt z. B. das Drehmoment während einer Umdrehung nur ein Maximum und ein Minimum, so muss der Ungleichförmigkeitsgrad sehr gering sein. Er kann um so grösser genommen werden, je mehr Maxima und Minima während einer Umdrehung vorhanden sind. Um die Gefahr des Mitschwingens zu vermeiden, ist es vorteilhaft, solche Antriebsmaschinen zu verwenden, bei denen die Variation des Drehungsmomentes während einer Umdrehung in mehrere, möglichst gleiche Perioden zerfällt. Die Schwingungszahl der Antriebsmaschine wird in diesem Falle in der Regel bedeutend grösser sein, als die der Dynamomaschine. Ist hierbei ausserdem ein grösseres Trägheitsmoment vorhanden, so ist ein sicheres Parallelarbeiten ohne Anwendung einer besonderen Dämpfungswicklung in der Regel leicht erreichbar. Der Elektriker darf sich nicht bei einem bestimmten Ungleichförmigkeitsgrad zufrieden geben, sondern er muss auf das Tangentialdruckdiagramm zurückgehen, wenn er einen sicheren Ausgangspunkt für seine weiteren Berechnungen gewinnen will.

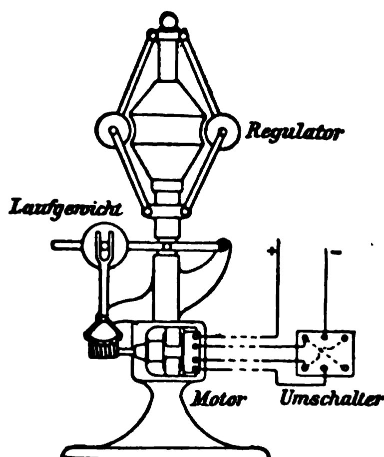


Fig. 354.

§ 187. Dampfmaschinenregulatoren.

Die Dampfmaschinenregulatoren sollen schnelllaufend sein und geringste Eigenreibung besitzen. Bei grossen Maschinen beeinflusst der Regulator sowohl den Hochdruck- als den Niederdruckcylinder. Die einfachste und unmittelbarste Beeinflussung sämtlicher Steuerungen ermöglichen unstreitig die Flachregler, bei denen die Schwingungsebene der Pendel zugleich die Umdrehungsebene ist. Die Eigenschaft der Flachregler, Voreilwinkel und Hub der Steuerexcenter unmittelbar zu beeinflussen, gestattet, bei den verschiedensten Steuerorganen die Füllung in den weitesten Grenzen rasch zu verändern. Wird die Last plötzlich weggenommen, so arbeiten Centrifugalregulatoren der Eigenwiderstände halber manchmal ziemlich unsicher; sie können unter Umständen nicht einmal das momentane Durchgehen der Maschine verhindern. Aus letzterem Grunde soll die Steuerung leicht beeinflussbar sein, also geringe Reibungswiderstände und geringe Masse besitzen; zweckmässig sind, namentlich für grössere Leistungen, Kolbenschiebersteuerungen. Für mittlere Leistungen und raschen Gang giebt die beste Ausführung eine Ventilsteuerung, deren Einlassexcenter direkt durch einen Flachregler verstellt wird.

An die Regulatoren werden noch weitergehende Ansprüche gestellt, da meist Parallelschaltung in Frage kommt. Die Regulatorgewichte sind einstellbar anzuordnen, um durch Verschiebung derselben absolut synchronen Gang der zuzuschaltenden mit der in Betrieb befindlichen Maschine zu erzielen. Empfehlenswert ist hierbei eine Einrichtung, wie sie der Firma Siemens & Halske patentiert (D. R.-P. 72 282) ist: Diese bringt an jedem Regulator einen kleinen Elektromotor an, mittels dessen das Laufgewicht vom Schaltbrett aus verstellt wird (Fig. 354 u. 355). Mittels dieser Vorrichtung lässt sich überdies während des Parallelbetriebes die Belastung nach Belieben

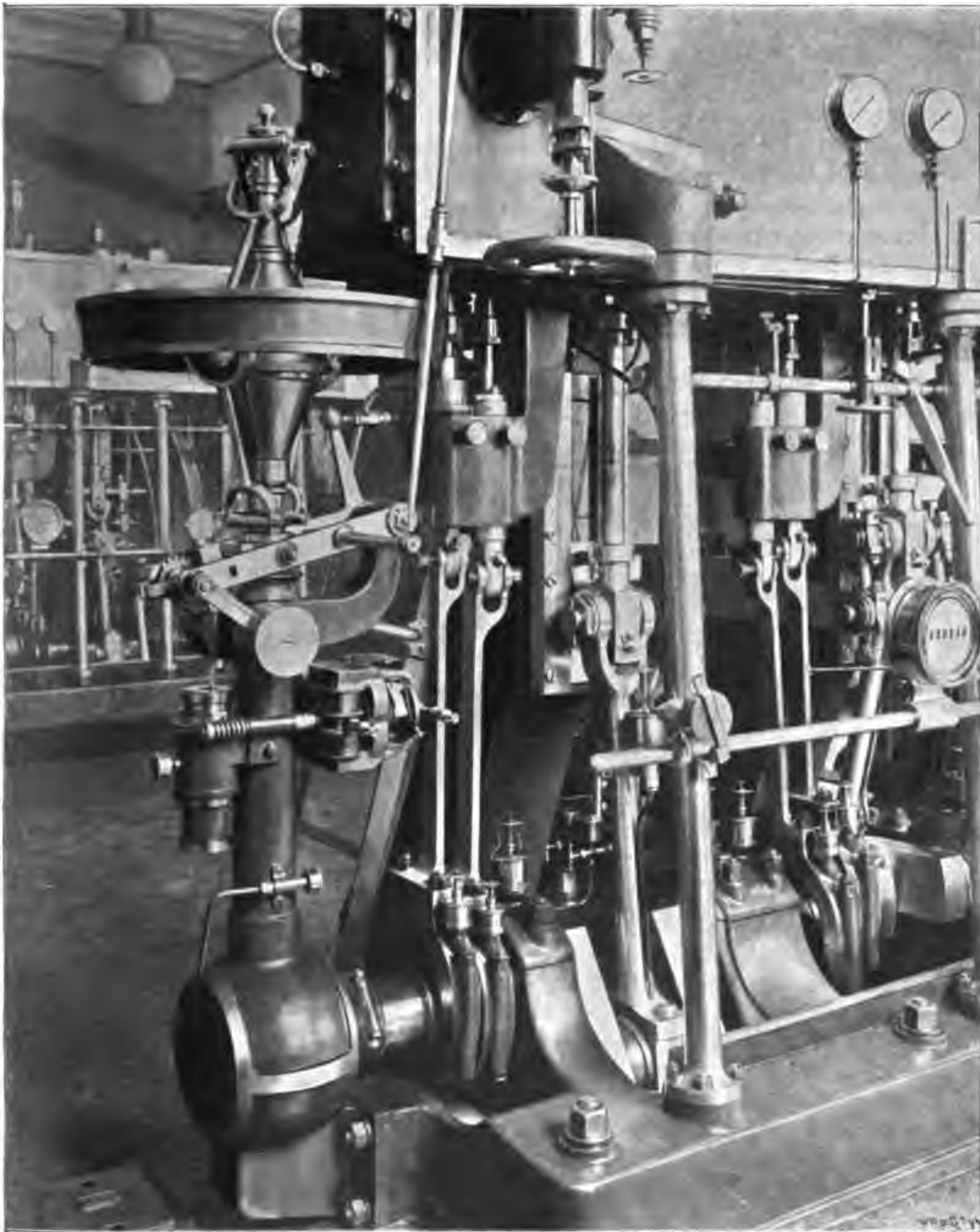


Fig. 355.

auf die einzelnen Maschinen verteilen und die Belastung der abzuschaltenden Maschine auf Null bringen.

H. Müller giebt in E. T. Z. 1899 eine ähnliche Konstruktion eines Geschwindigkeitsregulators (Fig. 356) an; letzterer schliesst den Stromkreis einer magnetischen Kupplung, welche die eigentlichen Steuerorgane in dem einen

oder anderen Sinn bethätigt. Die Kupplung kann jedoch auch in beliebigem Sinn jederzeit vom Schaltbrett aus in Thätigkeit gesetzt werden. Die Flachregler können ebenfalls von Hand oder durch Elektromotor zur Änderung der Tourenzahl verstellt werden. In der Z. D. J. 1896, S. 1142 ist z. B. eine derartige Anordnung angegeben: Ein durch ein Handrad verschiebbarer Hebel drückt auf einen Stift, der in der hohlen Dampfmaschinenwelle vom Wellenende zum Regulator verläuft. Dieser Stift wirkt auf einen Winkelhebel, der die Federn zusammendrückt, welche der Fliehkraft der angebrachten Gewichte entgegenwirken und verändert damit diese federnde Gegenkraft.

Die Bremstöpfe an den Regulatoren sind von besonderer Wichtigkeit, da allzugrosse Empfindlichkeit der Regulatoren durch Überregulieren und fortgesetztes Hin- und Herpendeln einerseits das Parallelschalten erschwert und andererseits die parallel geschalteten Maschinen unter Umständen ausser Tritt bringen kann, um so eher, je mehr die Belastung induktiv und variabel ist. Ausserdem sind in jeder Beziehung ähnlich gebaute Dampfmaschinen mit

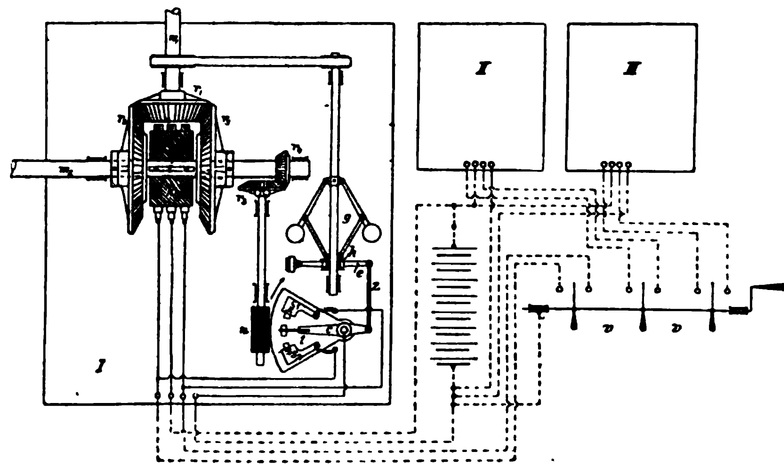


Fig. 356.

Regulatoren für gleichen Tourenabfall zu verwenden. Die Tourenzahl sollte sich beim Aus- und Einschalten der vollen Last nicht allzu sehr ändern.

Für Parallelbetrieb haben sich allerdings stark statische Regulatoren am besten bewährt, mit einer Tourenvariation von 5 bis 7 Proc. und mehr von Leerlauf auf Volllast. Die Regulatoren müssen gleichmässig wirken, nicht etwa von 0 auf $^1/_2$ Last um 1 Proc. und dann von $^1/_2$ bis Volllast um 3 bis 4 Proc. Der Einfluss verschiedener Kurven für die Tourenzahl der Regulatoren ist in Fig. 357—359 erläutert. In der ersten Figur kommen stark statische Regulatoren in Betracht. Handelt es sich um die Abgabe von ca. 200 KW insgesamt, so giebt bei den Kurven Fig. 357 der eine Generator 110 KW, der andere 90 KW ab, bei denjenigen Fig. 358 (Regulator mit geringem Abfall) der eine 130, der andere 70 und bei den Kurven Fig. 359 der eine 108, der andere 92. Die letzten Kurven eignen sich jedoch schlecht für geringe Belastung, bei Leerlauf der einen Maschine kann die andere schon mit 60 KW belastet sein. Bei Belastungsänderungen müssen die Regulatoren sämtlich gleichzeitig regulieren, da sonst stark oscillierende Ausgleichsströme auftreten.

Die wesentliche Ursache des schwierigen Parallelbetriebes ist bei den Dampfmaschinen in der hin- und hergehenden Bewegung und den daraus folgenden Pendelungen begründet, die zu den Eigenschaften der Dynamo in bestimmtem Verhältnis stehen müssen (siehe später).

§ 188. Direkte Kupplung.

Direkte Kupplung von Dampfmaschine und Dynamo giebt gedrängteste Bauart, kleinsten Platzbedarf und guten Wirkungsgrad. Bei 500 KW ist der Mehrpreis einer Dynamo für direkte Kupplung gegenüber Seilantrieb z. B. 35 Proc., dafür fallen aber Seilscheibe, Seile etc. in Fortfall und die Grundfläche ist viel geringer. Riemenbetrieb dagegen liefert billigere Dynamos und kann eventuell bequemere Parallelschaltung ermöglichen, da er eine elastischere Verbindung darstellt, als sie bei direkter Kupplung möglich ist. Doch lässt sich dieser Vorteil auch durch Verwendung einer nachgiebigen Kupplung an Stelle der viel benutzten starren Kupplung erzielen.

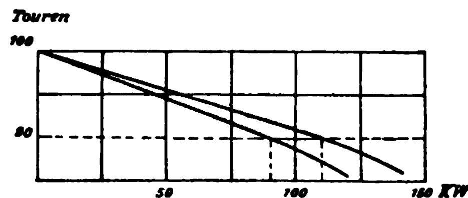


Fig. 357.

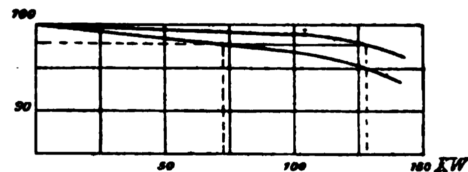


Fig. 358.

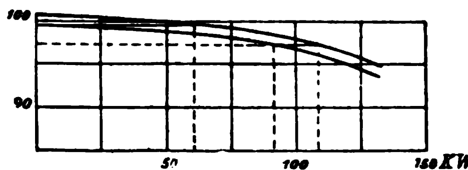


Fig. 359.

Werden zwei Wechselstromdynamos von derselben Welle mit Riemen angetrieben, so müssen die entsprechenden Scheiben absolut gleiche Grösse haben; eine verschiedene Verteilung der Last auf beide Maschinen ist so gut wie ausgeschlossen.

§ 189. Verschiedene Dampfmaschinentypen.

Stehende Maschinen mit kurzem Hub und hoher Tourenzahl beanspruchen wenig Raum und haben kleinere Kolben- und Schieberreibung als liegende, auch kann das Fundament leichter gehalten werden, und es sind grössere Umdrehungszahlen möglich, was gerade beim Antrieb von Dynamomaschinen von hoher Bedeutung ist. In grossen Centralen für Kraftverteilungszwecke werden allerdings bei Leistungen von 500 PS und mehr fast ausschliesslich langsamlaufende Verbundmaschinen mit Kondensation und schweren Schwungrädern verwendet.

Für kleine Anlagen, bei denen für Wartung und Anschaffungskosten nicht viel aufgewendet werden kann, empfehlen sich, falls nicht Gasmotoren in Betracht kommen, die kompendiösen rotierenden Dampfturbinen oder die kleinen Schnellläufer von Westinghouse, Willans und andern, die bei befriedigendem Wirkungsgrad nur wenig Raum und Bedienung erfordern, ruhigen gleichmässigen Gang besitzen und sehr anpassungsfähig sind.

§ 190. Turbinen.

Bezüglich Turbinen sei noch bemerkt, dass denselben, mögen sie nun mit vertikaler oder horizontaler Welle laufen, ein kräftiges Schwungrad zu geben ist. Die Schwungmassen haben hier die Aufgabe, äussere Kraftschwankungen, nicht diejenigen der Antriebsmaschine aufzunehmen. Die Schaufelzahl von Lauf- und Leitrad ist möglichst verschieden zu wählen. Bei der Parallelschaltung von Drehstromgeneratoren, die von Turbinen angetrieben werden, hat sich häufig gezeigt, dass Handregulierung der

Turbinen oder selbstthätige Regulierung nur einer Turbine einer rein selbstthätigen Regulierung aller Turbinen vorzuziehen ist. Von Turbinen angetriebene Drehstrommaschinen zeigen kaum je Schwierigkeiten beim Parallelschalten, da eben die in der Natur des Kurbelantriebs begründeten Pendelungen in Wegfall kommen. Eine Turbine kann auch nicht durchgehen, wie dies bei Dampfmaschinen zu fürchten ist.

§ 191. Antriebstourenzahlen. Im Interesse des Preises[1]) der Wechselstrommaschinen liegt es möglichst hohe Tourenzahl von den Antriebsmaschinen zu verlangen. Bei Maschinen von weniger als 300 bis 400 KW wird es bei Verwendung der Innenpoltype schwierig für geringere Touren als 150 bis 125 brauchbare Verhältnisse zu erhalten. Eine solche Maschine wird ausserordentlich schmal und bei der grossen Zahl von Polen — über 40 — ist es fast unmöglich die Erregerwicklung unterzubringen. Raschlaufende Dampfmaschinen haben allerdings meist hohen Dampfverbrauch und sind teurer.

55. Das Parallelschalten von Wechselstrommaschinen.

§ 192. Erfordernisse zum Parallelschalten. Soll eine Wechselstrommaschine zu einer bereits laufenden bezw. zu Sammelschienen parallel geschaltet werden, so muss dieselbe zunächst

1. auf gleiche Wechselzahl mit den in Betrieb befindlichen gebracht werden, d. h. bei gleicher Polzahl muss sie dieselbe Tourenzahl haben, wenn nicht, muss das Produkt aus Polzahl und Umdrehungszahl konstant sein. Diese Einstellung erfolgt durch Verstellen des Gewichtes des Dampfmaschinenregulators nach Fig. 355 oder 356.

2. Die Spannung sämtlicher Maschinen muss angenähert dieselbe sein, was durch Regulieren des Erregerstromes erreicht wird.

3. Die Phasen der verschiedenen Maschinen müssen übereinstimmen, d. h. die Spannungskurve aller Maschinen sollte im selben Augenblick durch Null gehen. Phasengleichheit lässt sich durch sogenannte Phasenindikatoren erkennen.

Bei Mehrphasenmaschinen müssen überdies gleichartige Leitungen parallel verbunden werden, was ein für allemal auszuprobieren ist. Es müssen z. B. bei Drehstrom die Leitungen mit den Strömen $a_1 \sin a$ mit $a_2 \sin a_1$; $a_1 \sin (a + 120)$ mit $a_2 \sin (a + 120)$; $a_1 \sin (a + 240)$ mit $a_2 \sin (a + 240)$ verbunden werden; nicht etwa $a_1 \sin (a + 120)$ mit $a_2 \sin (a - 120)^0$ etc. Ein etwa gemachter Fehler ist durch Vertauschung zweier Anschlüsse zu korrigieren.

§ 193. Schaltung zum Parallelbetrieb. In Fig. 360 ist ein Schaltungsschema der A. E. G. für parallelzuschaltende Drehstromgeneratoren gezeichnet; *M* sind die Erregerwicklungen, *E* die gemeinsame Erregermaschine. Die Verkettungspunkte sind durch *G* verbunden, was aber häufig nicht ratsam ist, da die Verbindungsleitung den Parallelbetrieb durch Ausgleichströme erschweren kann. *W* ist ein Wattmeter, *A* ein Strommesser, *V* ein Voltmeter. *P* sind Phasenindikatoren, die als einfache Glühlampen oder Voltmeter für 15 Proc. über Dynamospannung gebaut sein müssen; bei Einphasenlagen sind sie für doppelte Maschinenspannung zu bemessen. Bei Dreiphasenstrom ist falls *E* die Linienspannung ist, die maximal mögliche Spannung an den Lampen $\frac{2}{\sqrt{3}} E = 1{,}15\, E$. Solange die Wechselzahlen nicht gleich sind, wogt der Strom in den Indikatoren mit einer Periode gleich der

1) Siehe R. M. Friese, Z. V. D. J. 1899, S. 1181.

Differenz der beiden Periodenzahlen auf und ab, d. h. die Phasenglühlampen leuchten periodisch auf und werden wieder dunkel bezw. schwankt das Phasenvoltmeter hin und her. Ist die Wechselzahl der zuzuschaltenden Maschine sehr nahe gleich derjenigen der Sammelschienen, so leuchten die Lampen sehr langsam auf und z. B. im Augenblick des Erlöschens kann eingeschaltet werden. Die Verteilung der Last erfolgt durch Verstellen des

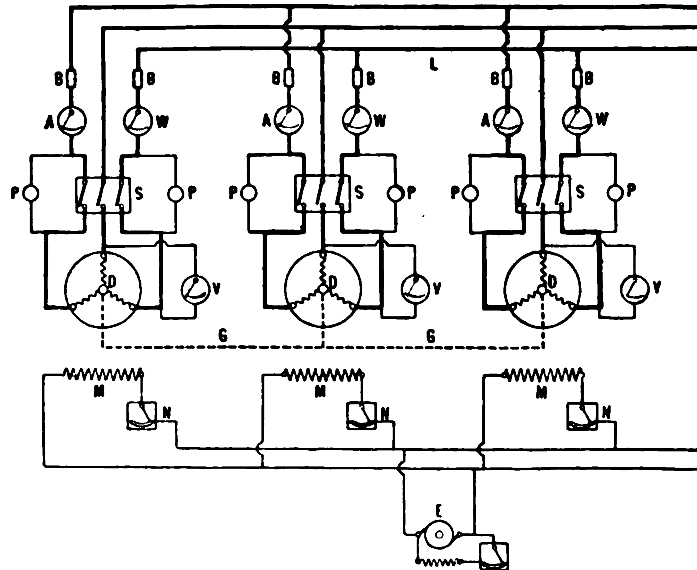


Fig. 360.

Regulatorgewichtes der Antriebsmaschinen, d. h. durch Änderung der Kraftzufuhr (der Dampf- oder Wassermenge).

Die Firma Siemens & Halske führt für Drehstromdynamos zum Phasen- und Periodenvergleichen die Schaltanordnung Fig. 361 aus (D. R.-P. 91 550). § 194. Phasen-Indikatoren von Siemens & Halske.

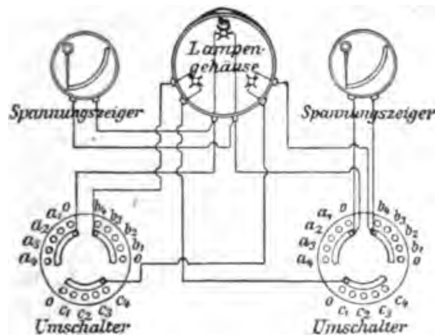


Fig. 361.

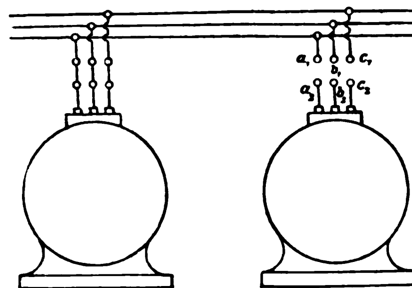


Fig. 362.

Die Kontakte $a_1\, b_1\, c_1$, $a_2\, b_2\, c_2$ ... des einen Umschalters werden an die Klemmen der einzelnen Dynamos angeschlossen, während die Kontakte $a_1\, b_1\, c_1$ .... des anderen Umschalters an die verschiedenen Sammelschienensysteme oder aber ebenfalls an die Dynamoklemmen angeschlossen werden. Es ist damit möglich zwei beliebige Maschinen, bezw. die Sammelschienen und jede Maschine

über die drei Glühlampen im Gehäuse aufeinander zu schalten. Es leuchten dann die drei Lampen bei annähernd richtiger Periodenzahl nacheinander, also in einer Kreisbewegung auf. Die kreisende Bewegung erfolgt in verschiedenem Sinne, je nachdem die zuzuschaltende Dynamo rascher oder langsamer läuft als die in Betrieb befindliche. Wenn dieser Zusammenhang ein für allemal festliegt, so geben die Lampen ein Mittel an die Hand, die Antriebsmaschine rasch auf die richtige Tourenzahl zu bringen. Dr. MICHALKE

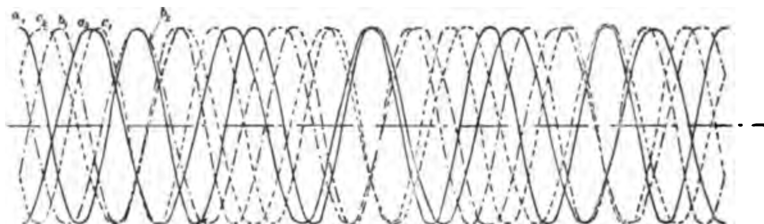


Fig. 363.

hat in E. T. Z. 1896, S. 573 eine Erklärung des erwähnten periodischen Aufleuchtens gegeben: In Fig. 362 ist Maschine I (links) mit den Sammelschienen verbunden, Maschine II ist richtig erregt und annähernd auf Touren. Die Potentiale in $a_1\ b_1\ c_1$ und $a_2\ b_2\ c_2$ sind in Fig. 363 gegeben, wobei angenommen, dass das Periodenverhältnis 5 : 6 ist. Schaltet man Lampen zwischen $a_1\ a_2$, $b_1\ b_2$ und $c_1\ c_2$, so treten an denselben die Spannungen $a_1 - a_2$, $b_1 - b_2$, $c_1 - c_2$ (Fig. 364) auf. Alle drei Lampen erlöschen mit

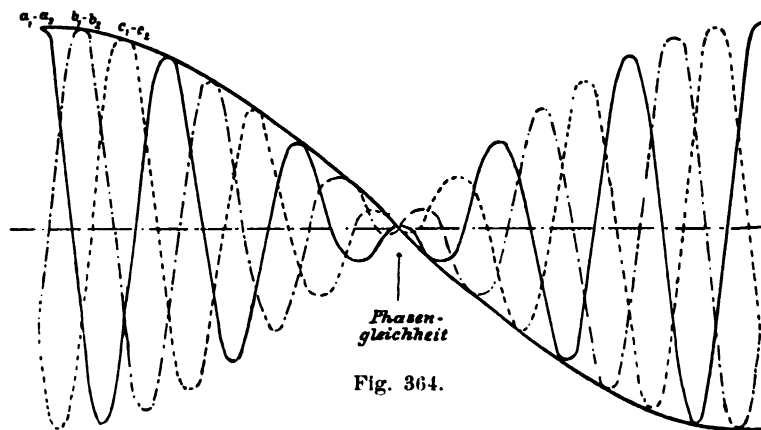


Fig. 364.

einemmal (Phasengleichheit). Verbindet man aber b_1 mit c_2, c_1 mit b_2 und a_1 mit a_2, so stellen sich die Spannungen $a_1 - a_2$, $b_1 - c_2$, $c_1 - b_2$ ein, die Lampen erlöschen nacheinander (Fig. 365) und dies ist die praktisch in Fig. 361 verwendete Schaltung.

Die Anordnung kann auch für Einphasengeneratoren benützt werden, wenn man Hilfswicklungen vorsieht oder sich eine Kombination von Transformatoren, Drosselspulen und Widerständen nach Fig. 366 (El. Rev. London 1900, Stansfield) herstellt, worin *C D E* die nacheinander aufleuchtenden drei Lampen, 1, 2, 3, 4 Transformatoren, 5, 6, 7, 9, 10 induktionsfreie Widerstände und 8 eine Drosselspule ist.

Statt der Phasenlampen oder der Phasenvoltmeter ist von MOLER & BEDELL der optische Indikator Fig. 367 vorgeschlagen worden. Derselbe besteht aus zwei hintereinanderstehenden Scheiben, je eine auf einem der Maschinenachsenenden. Bei acht Polen hat jede Scheibe vier gekrümmte Schlitze, allgemein einen pro Polpaar. Bei Synchronismus entsteht ein Lichtring, der an Ort und Stelle bleibt, während er bei einer Phasendifferenz radial nach § 195. Verschiedene Phasenindikatoren.

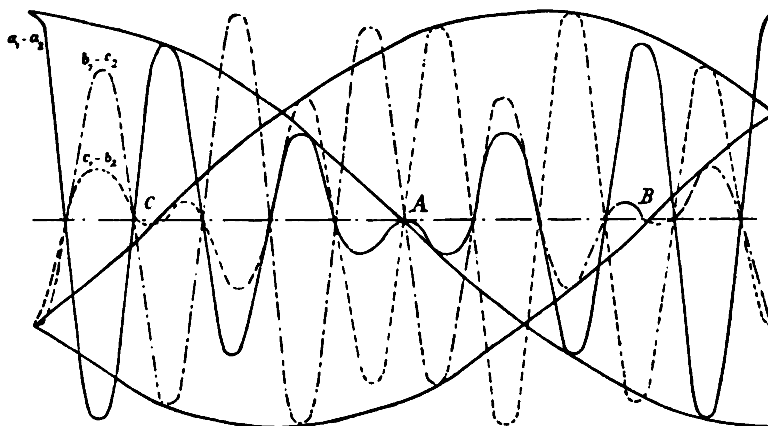


Fig. 365.

aussen oder innen wandert. Der Synchronismus lässt sich übrigens einfach erkennen, wenn es sich um Maschinen mit rotierenden Polen handelt, die in einer Flucht stehen, es scheinen nämlich dann die Pole gegeneinander still zu stehen. Betrachtet man eine sich drehende Maschine durch ein Prisma, das in gleichem Sinne mit halber Geschwindigkeit rotiert, so scheint die Maschine still zu stehen.

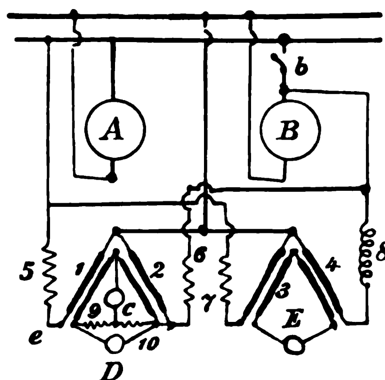
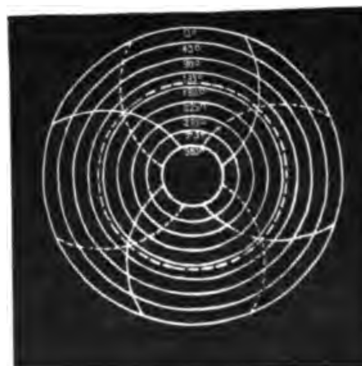


Fig. 366.


Fig. 367.

Auch akustische Phasenindikatoren sind z. B. von der Gen. El. Co. verwendet, die bei Abweichung vom Synchronismus Interferenztöne ergeben.

Es giebt Fälle, wo die Verhältnisse für das Parallelschalten so ungünstig liegen, dass das Einschalten neuer Maschinen nur dann erfolgen darf, wenn die zuzuschaltende Dampfmaschine auch genau die gleiche Kurbelstellung hat wie die übrigen, d. h. Fälle, wo es verhindert werden muss, dass die eine

Maschine gerade mit ihrer Geschwindigkeit v_{max} läuft, während die andere sich eben nur mit v_{min} dreht. Der Ausgleichstrom ist in solchem Falle besonders gross. Zur Erkennung gleicher Kurbelstellung dient häufig ein elektrischer Kontakt je an beiden Maschinen; wenn beide Kontakte geschlossen sind, ertönt eine Klingel.

§ 196. Einfache Theorie des Parallelarbeitens. Das Arbeiten einer Wechselstrommaschine[1]) auf Sammelschienen lässt sich auf Grund des Diagrammes Fig. 368 veranschaulichen, wobei der in modernen Maschinen stets geringe OHM'sche Verlust vernachlässigt ist. Das Feld der betrachteten Wechselstrommaschine erzeugt eine gewisse Ampèrewindungszahl AW_f. An den Klemmen herrscht die Klemmenspannung E_k der Sammelschienen. E_k entspricht aber rückwärts ein bestimmtes Kraftlinienfeld K in der Maschine und dieser eine (resultierende) Ampèrewindungszahl AW_r. Es stellt sich nun ein Ankerstrom J von solcher Stärke und Phase ε ein, dass das Ankerfeld AW_a zusammengesetzt mit AW_f die genannten AW_r giebt. Eine weitere Bedingung ist jedoch die, dass die von der Maschine an die Sammelschiene gelieferte Arbeit

$$p' \, J E_k \cos \varepsilon$$

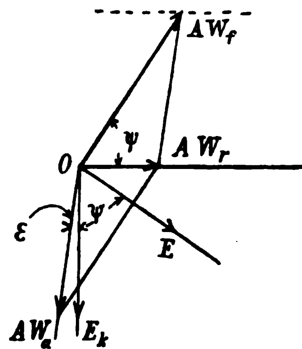


Fig. 368.

gleich der von der Dampfmaschine erzeugten, abzüglich der Verluste ist (p' soll die Phasenzahl berücksichtigen). Ist die letztere auf eine bestimmte Leistung eingestellt, so verläuft die Spitze des Dreiecks $0 \, AW_r \, AW_f$ (Fig. 368) auf einer Parallelen zur Grundlinie AW_r und zu jedem Erregerstrom (AW_f) der Maschine findet sich aus dem Dreieck von konstantem Inhalte der Ankerstrom aus AW_a und die Phase ε zwischen Strom und E_k angenähert aus

$$\varepsilon = \sphericalangle (AW_a, AW_r) - 90^0.$$

Zeichnet man den Strom J in Abhängigkeit des Erregerstromes auf, so findet sich die V-Kurve (Fig. 284), die zeigt, dass der Strom von einem Minimum nach beiden Seiten ansteigt und dass bei einem gewissen grössten und kleinsten Erregerstrom die Maschine überhaupt keinen Strom mehr abgiebt und die Antriebsmaschine durchgeht bezw. entlastet wird. Die V-Kurve biegt an diesen Stellen nach innen um.

Während eben angenommen wurde, dass der Antriebsmotor auf eine bestimmte Leistungsabgabe (z. B. durch bestimmte Einstellung der Füllung oder der Einlassschütze) eingestellt war, sei nun vorausgesetzt, dass die betrachtete Wechselstrommaschine mit den übrigen laufenden unter einem ganz genau festgelegten Winkel zwangsläufig gekuppelt sei, so dass die elektromotorische Kraft E der Maschine bezw. die Feld-AW_f mit der Klemmenspannung E_k oder den AW_r einen bestimmten Winkel ψ einschliesse (Fig. 368). Liegt nun die Erregung der Maschine d. h. AW_f fest, so ist aus AW_f, AW_r, das zu E_k gehört, und ψ das Dreieck $AW_f \, AW_r \, 0$ zu konstruieren. Aus AW_a ergiebt sich der Ankerstrom J und die abgegebene Leistung ist

$$p' \, J E_k \cdot \cos \varepsilon,$$

wobei ε der Winkel zwischen E_k und AW_a ist.

1) Siehe KAPP, Die Dynamomaschinen.

Ist $E = E_k$, was annähernd immer der Fall ist, so wird für $\psi = 0$ auch J und die Leistung Null. Mit zunehmenden ψ findet sich auch eine zunehmende Leistung. Dieselbe ist in Fig. 369 in Abhängigkeit des Phasenwinkels ψ zwischen den zwei betrachteten Maschinen in Polarkoordinaten (links von der Vertikalen) aufgetragen. Die maximale Leistung wird annähernd bei $\psi = 90^0$ abgegeben, dieselbe ist einfach $aA =$

$$p' \cdot J_k \cdot E_k,$$

wenn J_k der Kurzschlussstrom der Maschine für die eingestellte Erregung ist.

Auch wenn die zwei Wechselstrommaschinen nicht zwangsläufig gekuppelt sind, verhalten sie sich in der besprochenen Weise. Steigt z. B. aus irgend einem Grund die der Dynamo zugeführte Leistung, so steigt auch die abgegebene Leistung der Dynamo, die Phasenverschiebung ψ wird grösser, so dass der Leistungsfaktor $\cos \varepsilon$ nach Fig. 368 steigt. Antriebsmotor und Dynamo regulieren sich ganz selbstthätig gegenseitig und der Betrieb ist ganz stabil. Ist jedoch die Dynamo bis zu der Leistung aA (Fig. 369) belastet und nimmt dann der Phasenwinkel noch weiter zu, so sinkt die Leistung der Dynamo wieder, die Dampfmaschine geht durch, indem sich die Lage mehr und mehr verschlimmert, da mit abnehmender Leistung der Phasenunterschied immer mehr anwächst. Auf dem oberen Teil der Leistungskurve kann nur stabil gearbeitet werden, wenn die parallellaufenden Maschinen fest gekuppelt sind. Die Maschinen sind allerdings in diesem Falle eigentlich nicht mehr parallel, sondern hintereinandergeschaltet, da der Phasenwinkel derselben grösser als 90^0 ist. Der Winkel ψ sollte bei modernen Maschinen nicht grösser als 20^0 bis 40^0 sein, wenn man der Selbstregulierung sicher und vor Durchgehen und Aussertrittfallen sowie übermässigen Ausgleichströmen zwischen den einzelnen Maschinen geschützt sein will. Der Winkel 20^0 bis 40^0 ist als wirkliche Phasenverschiebung aufzufassen; bei $2p$ Polen darf der räumliche Winkel der Wechselstrommaschinen nur $\frac{20}{p}$ bezw. $\frac{40}{p}$ sein.

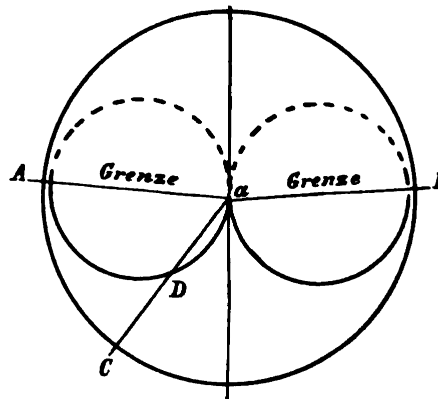


Fig. 369.

Zwei Maschinen, die parallel arbeiten, üben dadurch, dass eine Maschine einen Teil ihrer Arbeit bei einer Differenz der Antriebsmaschinengeschwindigkeit auf die andere überträgt, eine gewisse Kontrolle[1]) aufeinander aus und innerhalb gewisser Grenzen arbeiten die Maschinen, wie wenn sie zwangsläufig gekuppelt wären. Die synchronisierende Kraft, die diese Kontrolle ausübt, hängt von der Stromstärke ab, die zwischen beiden Maschinen auftritt, sobald eine Phasendifferenz in der beiderseitigen Antriebsgeschwindigkeit entsteht. Ein Ausgleichstrom kann sich nur einstellen, wenn die aus den beiden elektro-

§ 197. Synchronisierende Kraft.

1) Siehe auch „Alternating Current Phenomena" von STEINMETZ den Abschnitt über „Synchronising Alternators".

motorischen Kräften der Maschinen resultierende elektromotorische Kraft nicht Null ist, denn diese Resultierende der für den Ausgleichstrom hintereinandergeschalteten Maschinen erzeugt diesen eben. Sind die elektromotorischen Kräfte gleich und ihre Phasenverschiebung Null, so fliesst kein Strom zwischen den Maschinen. Ist eine Phasenverschiebung ε zwischen den Maschinen vorhanden, so entsteht ein Strom J_a vermöge der elektromotorischen Kraft $E = E_1 = E_2$ ($= EMK$ pro Maschine):

$$E_r = 2\ E \sin \frac{\varepsilon}{2}.$$

Der von der einen Maschine aufgenommene Effekt ist gemäss Fig. 370

$$J_a\ E_r \cos \left(\psi - \frac{\varepsilon}{2}\right)$$

der von der andern abgegebene

$$J_a\ E_r \cos \left(\psi + \frac{\varepsilon}{2}\right).$$

ψ ist der Winkel zwischen J_a und E_r.

Bei kleinen Winkeln ε sind dieselben beide gleich

$$J_a\ E_r \cos \psi.$$

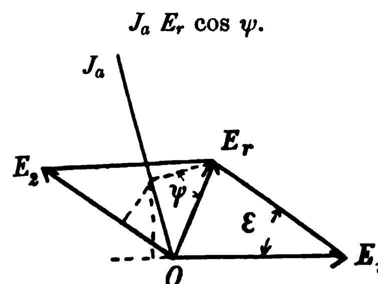


Fig. 370.

§ 198. Günstigste Bedingungen für das Parallelschalten. Dieser kontrollierende Effekt soll nun ein Maximum werden, was sich durch Einsetzen von

$$J_a = \frac{E_r \sin \psi}{w}$$

dann einstellt, wenn $E_r^2 \sin \psi \cos \psi$ ein Maximum d. h. $\psi = 45^0$ wird. w ist die Summe der Widerstände beider Anker und der Verbindungsleitungen. ψ wird 45^0, wenn

$$2 \pi n L = w$$

ist, d. h. wenn die Induktanz gleich dem OHM'schen Widerstand ist.[1]) Es gilt dies zunächst für die Summe dieser Ausdrücke in beiden Maschinen und den Verbindungsleitungen, annähernd ist die Bedingung jedenfalls auch pro Maschine zu erfüllen. Die Bedingung verlangt also, dass die Selbstinduktion verhältnismässig klein sein muss. Die meisten modernen Maschinen besitzen allerdings Werte

$$2 \pi n L = 2 \text{ bis } 10 \cdot w.$$

Verschwindend klein darf L auch nicht werden, da sonst die synchronisierende Kraft so sehr reduziert wird, dass ein Parallelbetrieb unmöglich wird. Für gutes Parallelschalten empfehlen sich also Generatoren mit geringem in-

1) Zuerst von HOPKINSON angegeben.

duktivem Spannungsabfall, d. h. mit grossem Kurzschlussstrom. Die Bedingung $\frac{2\pi n L}{w} = 1$ liesse sich nur durch Verwendung von Kondensatoren zur teilweisen Neutralisierung der Selbstinduktion erreichen. Die mit Compoundwicklung nach LEBLANC versehenen Generatoren mit grosser Ankerrückwirkung eignen sich sehr gut für den Parallelbetrieb.

GÖRGES zeigt E. T. Z. 1900, S. 188, dass es für den Parallelbetrieb ratsam ist, die Reduktion von $2\pi n L$ nicht zu weit zu treiben, da es gerade die Selbstinduktion in den Maschinen ist, die bei einem Arbeiten der einen Maschine auf die andere die Arbeitskomponente der Stromstärke gross, die wattlose Komponente gering macht.

Auch bei bedeutender Abweichung von dieser theoretischen Bedingung ist ein guter Parallelbetrieb möglich, wenn man dafür sorgt, dass die Last möglichst gleichmässig verteilt wird, wenn man Antriebsmotoren mit bestimmt begrenzter Leistungsfähigkeit verwendet — kleine Dynamos mit grossen Dampfmaschinen gekuppelt laufen schlecht parallel — und die Regulatoren entsprechend einstellt, ferner zur Verminderung von Oscillationen den Antriebsmotoren grossen Gleichförmigkeitsgrad verleiht oder elektrische Dämpfer anbringt. (Siehe später unter „Pendeln der parallelgeschalteten Maschinen“.)

Maschinen mit geringer Polzahl sind leichter parallel zu schalten, als solche mit vielen, da die absolute Phasenverschiebung $\frac{\alpha}{4}\delta p$ zwischen den einzelnen Maschinen mit der Polzahl zunimmt (§ 186). Geringe Periodenzahl ist aus dem gleichen Grunde günstig, überdies lassen sich dabei auch stärkere Felder wählen.

Zwei Maschinen mit verschiedener Polzahl, ebenso solche von verschiedener Spannungskurve eignen sich nicht besonders zum Parallelschalten, obwohl z. B. in der Züricher Centrale KAPP'sche raschlaufende Flachringmaschinen (spitze Kurve) mit einem neuen grossen Oerlikoner Drehstromgenerator der Induktionstype von wenig Touren gut parallel arbeiteten, trotzdem letztere unter Hintereinanderschaltung zweier Phasen (flache Kurve) als Einphasengenerator verwendet wurde.

Dr. BENISCHKE unterscheidet E. T. Z. 1899 zwischen einem wattlosen Ausgleichstrom, der infolge verschiedener Erregung d. h. infolge verschiedener elektromotorischer Kraft zweier Maschinen auftritt und der bezweckt, dass die Klemmenspannung beider Maschinen gleich wird, und einen ausgleichenden Wattstrom bei verschiedener Geschwindigkeit zweier Generatoren. Es ist dies der Strom, der oben als synchronisierender besprochen wurde. Dieser letztere kann namentlich dann gross werden, grösser als der Betriebsstrom, wenn Maschinen von schlechtem Gleichförmigkeitsgrad dann parallelgeschaltet werden, wenn ihre Kurbelstellungen verschieden sind. Da der Ausgleichstrom J_a ist: § 199. Ausgleichstrom.

$$J_a = \frac{E_r}{\sqrt{w^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}}$$

wobei E_r die durch die Geschwindigkeitsdifferenzen erzeugte elektromotorische Kraft ist, so lässt sich derselbe durch Einschalten von Selbstinduktion in die Verbindungsleitungen beliebig verkleinern. Zwei Generatoren, die von derselben Maschine angetrieben werden, lassen sich von vornherein so kuppeln, dass ihre Geschwindigkeit immer zusammen variiert, bei Riemenantrieb stellen

sie sich von selbst auf diese relative Lage ein, sodass der Parallelbetrieb anstandslos vor sich geht. Beim Arbeiten von Wechselstrommaschinen auf rotierende Umformer treten oft starke Ausgleichströme aus dem obengenannten Grunde auf, da der Umformer nicht die Tourenschwankungen eines Motors mit hin- und hergehenden Massen besitzt; es tritt also eine periodisch schwankende Differenz der elektromotorischen Kräfte der Maschine und des Umformers auf, deren Wirkung nur durch Selbstinduktion vermindert werden kann.

In Fig. 371 ist der Einfluss der verschiedenen Spannungskurvenform zweier Maschinen veranschaulicht. I und II sind die Spannungen der parallelarbeitenden Maschinen, die Differenz III giebt Anlass zu einem Ausgleichstrom, wobei allerdings der induktive Widerstand $6\pi n L$ nicht bloss wie bei einfach periodischen Wellen $2\pi n L$ ist, sodass der Ausgleichstrom nicht gross ausfällt. Bei Maschinen der Gleichpoltype, wo das Feld nur halbperiodisch symmetrisch ist, nicht viertelperiodisch wie bei Wechselpolen, können unsymmetrische Spannungen nach Fig. 372 Kurve I auftreten, die Anlass zu starken Ausgleichströmen durch die Spannungskurve III geben, deren Periodenzahl $2n$ sein kann, nicht $3n$ und mehr wie zuvor. Interessant ist, dass diese Un-

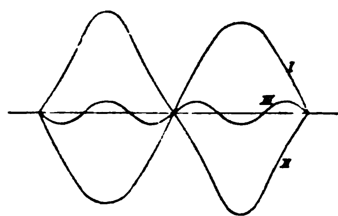


Fig. 371.

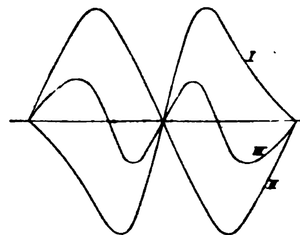


Fig. 372.

symmetrie sich wesentlich nur in den Phasenspannungen ausprägt und sich bei verketteten Mehrphasenspannungen wieder grösstenteils verliert. Es zeigte sich auch, dass der Ausgleichstrom beim Parallelbetrieb einer solchen Gleichpoltype mit einer Wechselpoltype nur sehr gross war, wenn die Verkettungspunkte der Maschinen verbunden waren.

Da die Selbstinduktion einer Maschine den Ausgleichstrom bei Parallelbetrieb vermindert, so erklärt sich damit die Thatsache, dass Maschinen sich schwach erregt anders als bei starker Erregung bezw. bei verschiedener Schaltung der Ankerwicklung verschieden verhalten, indem sich die Ankerrückwirkung und damit die Selbstinduktion bei diesen Verschiebungen verändert. Burch hat in El. World 1898 empfohlen, Maschinen überhaupt unerregt auf die Sammelschienen zu schalten und erst dann zu erregen. Compoundierte Wechselstrommaschinen müssen wie Gleichstrommaschinen mit einer Ausgleichsleitung zwischen den Anfängen der dicken Wicklung versehen werden.

§ 200. Besondere Vorrichtungen zum Parallelschalten. Um die Einschaltung von Wechselstrommaschinen im Moment des Synchronismus auszuführen, wurde von der Firma Siemens & Halske namentlich für kleine Maschinen eine ihr früher mit D. R.-P. 39680 geschützte Einrichtung verwendet. Dieselbe bestand aus einem Elektromagnet, dessen eine Spule mit der bereits im Betrieb befindlichen Maschine und dessen zweite Schenkelspule mit der zuzuschaltenden Maschine verbunden wurde. Trat nun Coïncidenz der Stromimpulse beider Maschinen ein, so zog der Magnet

seinen Anker an und bewirkte dadurch die Schliessung des Hauptausschalters der zuzuschaltenden Maschine, vollzog also die Parallelschaltung im richtigen Moment.

Das Zusammenschalten und Trennen von Wechselstrom- oder Drehstrommaschinen pflegte man in früheren Jahren unter Zuhilfenahme einer Lampenbatterie auszuführen, um die Oscillationen beim Zuschalten zu schwächen, die oft Anlass zum Aussertrittfallen wurden. Man liess also die zuzuschaltende

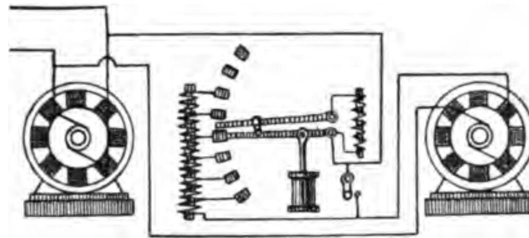


Fig. 373.

Maschine mit ähnlicher Belastung wie die bereits im Gange befindliche Maschine auf die Lampenbatterie arbeiten, brachte beide auf gleiche Tourenzahl und Spannung und vollzog die Parallelschaltung, sobald der Phasenindikator die Übereinstimmung der Stromphasen beider Systeme angab.

In Fig. 373 ist statt der Lampenbatterie eine Drosselspule mit abschaltbaren Windungen dazu benutzt, die zuzuschaltende Maschine genügend zu

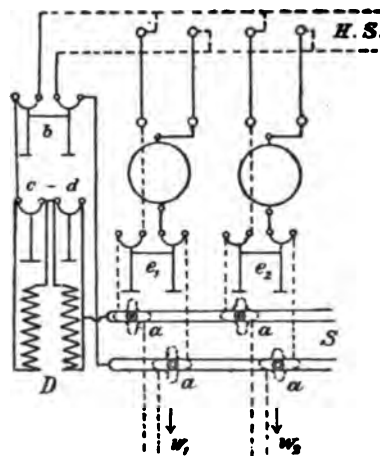


Fig. 374.

belasten. Der Schalthebel ist zweiteilig mit wanderndem induktivem Widerstand zur Dämpfung des Spulenkurzschlusses beim Übergang von einer Stufe zur andern.

Kapp hat in E. T. Z. 1894 die Anordnung Fig. 374 angegeben. *aaaa* sind Stöpselkontakte, wodurch zunächst die Maschine W_2 auf die Sammelschienen *S* geschlossen werden kann, während die Ausschalter *b*, *c*, *d*, e_2 noch offen sind. Hat die Maschine annähernd richtige Touren und richtige Spannung, so schliesst man den Schalter *b*, wodurch die Maschine W_2 über die

Drosselspule *D* auf die Hauptsammelschienen *HS* geschlossen wird. Die Maschine W_2' wird nun durch die übrigen Maschinen vollends in Synchronismus gebracht und man kann die Drosselspule *D* in zwei Stufen durch die Schalter *c* und *d* kurzschliessen. Schliesslich wird e_2 direkt geschlossen und die Stöpsel *a a* wieder gezogen.

Siemens Bros. liessen sich das Verfahren Fig. 375 patentieren. Die Sammelschienen und die zuzuschaltende Maschine werden je auf eine Wicklung

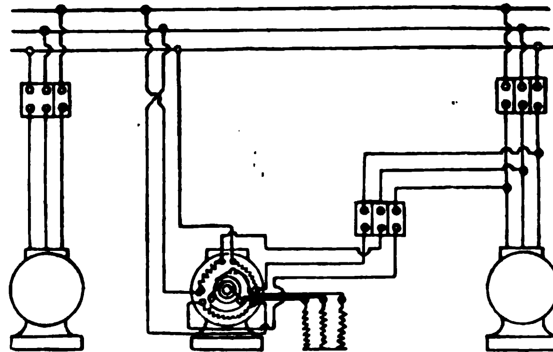


Fig. 375.

desselben Induktionsmotors geschlossen. Dabei wirken die beiden Kreise durch Induktion synchronisierend aufeinander ein. Die Wirkung wird durch einen zusätzlichen Widerstand im Ankerkreise geregelt.

In Fig. 376 ist eine ähnliche Anordnung skizziert, wobei die beiden Wickelsysteme dazu benutzt werden,

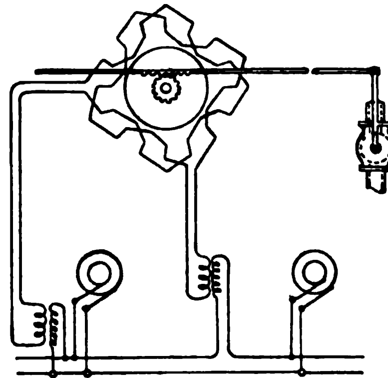


Fig. 376.

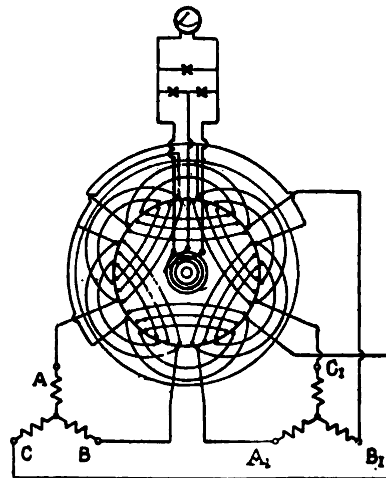


Fig. 377.

den Anker derart zu verdrehen, dass das Drosselventil und damit die Arbeitszufuhr verstellt wird.

Es lässt sich auch ein Induktionsmotor mit dem Windungsverhältnis 1 : 1 derart benutzen, dass der Ständer an die Sammelschienen, der Läufer an die zuzuschaltende Maschine angeschlossen wird. Bremst man den Anker zunächst fest, so kommen die zuzuschaltenden Maschinen rasch in Synchronismus und das Drehmoment des Motors wird Null.

W. RITTER, E. T. Z. 1900, nennt die letztbesprochenen Einrichtungen Phaseninduktoren. In Fig. 377 ist ein solcher Phaseninduktor mit drei Phasenlampen im induzierten Teil, die bei Synchronismus völlig erlöschen, gezeichnet. $A\ B\ C$ und $A_1\ B_1\ C_1$ sind die beiden Drehstrommaschinen.

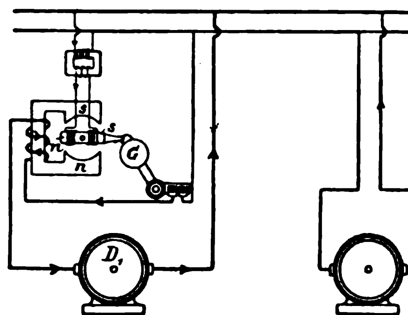


Fig. 378.

§ 201. Rückstromausschalter

Um parallelgeschaltete Drehstrommaschinen davor zu schützen, dass die eine oder andere infolge einer Störung von den Sammelschienen aus angetrieben wird, empfiehlt sich die Konstruktion Fig. 378 von ANDREWS, die in ähnlicher Weise auch als Maximalausschalter benutzt werden kann. Der Apparat besteht aus dem vom Maschinenstrom durchflossenen Feldmagneten, zwischen dessen Polen ein von der Sammelschienenspannung erregter Anker drehbar angeordnet ist. Solange die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung gleich Null bezw. kleiner als 90° ist, stützt der Anker das Gewicht G; wird sie grösser als 90°, d. h. schlägt der Strom um, so fällt das Gewicht G nach unten und die Leitung wird unterbrochen.

§ 202. Parallelschalten von Gasdynamos.

Gasdynamos bieten für das Parallelschalten mehr Schwierigkeiten als Dampfmaschinen, da ihr Gleichförmigkeitsgrad geringer, im allgemeinen kaum über $^1/_{100}$ bis $^1/_{125}$ ist. Will man also eine Gasdynamo, die leer läuft, zu einer belasteten zuschalten, so wird im Augenblick des Einschaltens Tourenzahl und Ungleichförmigkeitsgrad verschieden sein, jedenfalls letzterer

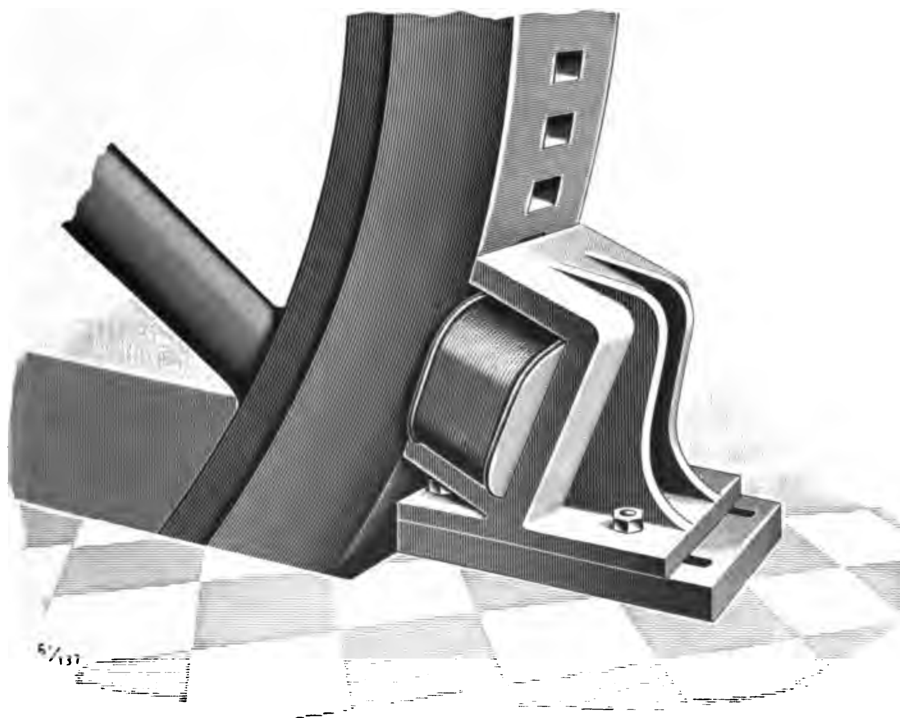


Fig. 379.

selbst dann, wenn die Regulatoren auf gleiche Tourenzahlen eingestellt sind. Ein starker Ausgleichsstrom, bezw. eine starke Spannungsschwankung ist also beim Zuschalten unvermeidlich. Auch beim Abschalten ist eine Reduktion des Stromes auf Null unmöglich. G. DETTMAR hat nun zur Erzeugung einer künstlichen Belastung der zuzuschaltenden Gasdynamo die magnetische Schwungradbremse Fig. 379 konstruiert. Durch den Magneten, dessen Stärke durch Veränderung des Erregerstroms geregelt werden kann, werden in dem Schwungrad neben Hysteresis starke Wirbelströme erzeugt, wodurch die Antriebskraft in Wärme umgesetzt wird. Die Erwärmung wird in der Regel keinen schädlichen Umfang annehmen, da das Schwungrad gut ventiliert ist und eine grosse Ausstrahlungsfläche besitzt und der ganze Vorgang sich in Sekunden oder wenigen Minuten abspielt.

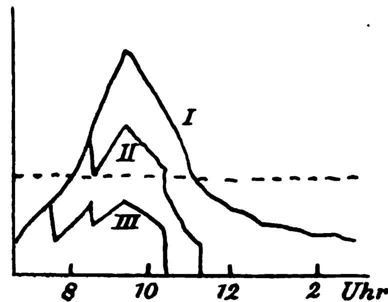


Fig. 380.

§ 203. Leistungskurven.

In Fig. 380 sind die Leistungskurven dreier parallelgeschalteter Wechselstrommaschinen in Abhängigkeit der Zeit von 6 Uhr bis 2 Uhr nachts, gezeichnet. Die Maschine I ist stets eingeschaltet. Die Maschine III wird um $7\,^1/_2$ Uhr zu-, um $10\,^1/_2$ Uhr abgeschaltet, die Maschine II um $8\,^1/_2$ bezw. $11\,^1/_2$ Uhr. Die Maschine I leistet eine Arbeit, die jeweils als Ordinatendifferenz zwischen I und II bezw. I und III, wenn II ausgeschaltet ist, oder als ganze Ordinate dargestellt ist, falls II und III abgeschaltet sind.

§ 204. Genauere Theorie des Parallelarbeitens.

Von verschiedener Seite, z. B. von BOUCHEROT und BLONDEL (Lum. électr. Bd. 45 u. 46) sind umfangreiche Theorien über das Parallelschalten von Wechselstrommaschinen entwickelt worden, die den Rahmen dieses Werkes überschreiten. Es sei nachstehend nur eine derartige mathematische Auseinandersetzung nach WHITWELL (El. Rev. London 1893) angedeutet:

Die zwei parallelarbeitenden Maschinen haben den Widerstand w und den Selbstinduktionskoeffizienten L, die elektromotorischen Kräfte $E \sin \omega t$ und $E \sin (\omega t + \psi)$; der äussere gemeinsame Belastungswiderstand sei W; dann liefert der nacheilende Generator den Strom

$$i_1 = E\sqrt{X^2 + Y^2} \sin (w t - \varepsilon),$$

der voreilende

$$i_2 = E\sqrt{A^2 + B^2} \sin (\omega t - \xi).$$

Hierbei ist:

$$X = \frac{\beta}{\alpha^2 \gamma} \cos (\psi_3 + \psi_2) - \frac{W}{\alpha \gamma} \cos (\psi_3 + \psi_1 - \psi),$$

$$Y = \frac{\beta}{\alpha^2 \gamma} \sin (\psi_3 + \psi_2) - \frac{W}{\alpha \gamma} \sin (\psi_3 + \psi_1 - \psi),$$

$$A = \frac{\beta}{\alpha^2 \gamma} \cos (\psi_3 + \psi_2 - \psi) - \frac{W}{\alpha \gamma} \cos (\psi_3 + \psi_1),$$

$$B = \frac{\beta}{\alpha^2 \gamma} \sin (\psi_3 + \psi_2 - \psi) - \frac{W}{\alpha \gamma} \sin (\psi_3 + \psi_1),$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{Y}{X}, \quad \operatorname{tg} \xi = \frac{B}{A},$$

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{\omega L}{w}, \quad \alpha = \sqrt{w^2 + \omega^2 L^2},$$

$$\beta = \sqrt{(\alpha^2 + W w)^2 + (W \omega L)^2},$$

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{W \omega L}{\alpha^2 + W w},$$

$$\gamma = \sqrt{(2 W + w)^2 + \omega^2 L^2},$$

$$\operatorname{tg} \psi_3 = \frac{\omega L}{2 W + w}.$$

Die nacheilende Maschine leistet in Watt

$$\tfrac{1}{2} E^2 \left\{ \frac{\beta}{\alpha^2 \gamma} \cos(\psi_3 + \psi_2) - \frac{W}{\alpha \gamma} \cos(\psi_3 + \psi_1 - \psi) \right\} = \tfrac{1}{2} E^2 X, \quad (92)$$

bei einem Phasenwinkel ε zwischen Strom und Spannung.

Die voreilende leistet

$$\tfrac{1}{2} E^2 \left\{ \frac{\beta}{\alpha^2 \gamma} \cos(\psi_3 + \psi_2) - \frac{W}{\alpha \gamma} \cos(\psi_3 + \psi_1 + \psi) \right\}$$
$$= \tfrac{1}{2} E^2 \left\{ A \cos \psi - B \sin \psi \right\}, \quad \ldots \ldots \quad (93)$$

bei einem Phasenwinkel $\psi + \xi$.

56. Das Pendeln parallelgeschalteter Wechselstrommaschinen.

Die Bewegung einer Dynamo, die durch eine Dampfmaschine betrieben wird, setzt sich aus einer drehenden und einer schwingenden zusammen. Die Schwingungen erfolgen um die synchrone Geschwindigkeit und verursachen die synchronisierenden Ströme. Diese Schwingungen[1]) werden zunächst der Dynamo durch die Dampfmaschine aufgedrückt, es sind also **erzwungene** Schwingungen, aber sobald diese auftreten, kommt die synchronisierende Kraft ins Spiel, welche die Dynamo wieder in den Synchronismus zurückführt, bezw. sogar über diesen hinaustreibt. Dies sind **Eigenschwingungen**, die von der synchronisierenden Kraft und dem Trägheitsmoment der rotierenden Teile abhängen. Diese beiden Schwingungen werden durch Resonanz verstärkt und geben Anlass zu Schwebungen bezw. Interferenzerscheinungen, die am meisten zu fürchten sind, wenn die beiden Schwingungsdauern annähernd gleich sind. Die Periode der Eigenschwingung der Dynamo berechnet sich nach der bekannten Beziehung

§ 205. Erzwungene und eigene Schwingungen.

§ 206. Schwingungsdauer

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Theta}{2 p M}}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (94)$$

worin Θ das Trägheitsmoment, $2p$ die Polzahl und M das Drehmoment ist.

---

1) Siehe „La Lum. El.", Bd. 45 S. 265, BOUCHEROT; „La Lum. El.", Bd. 45 und 46, BLONDEL; „La Lum. El.", Bd. 46 S. 601 und 651, HUTIN u. LEBLANC; „ETZ" 1899, S. 134, KAPP; „L'Eclairage Electrique", Bd. 20 S. 281, GUILLAUME; „L'Eclair. Electr.", Bd. 21 S. 121, BOUCHEROT; „ETZ" 1900, S. 188, GÖRGES.

Ersetzt man M und $2p$ entsprechend, so ergiebt sich für Einphasenmaschinen und $\cos\varphi = 1$

$$T = 2\pi \frac{u}{60} \sqrt{\frac{2 g \pi \cdot \Theta}{n E_k J_k}}, \quad \ldots \ldots \quad (95)$$

worin $g = 9{,}81$, u die minutliche Umdrehungszahl, n die Periodenzahl, E_k die effektive Klemmenspannung und J_k der Kurzschlussstrom bei normaler Erregung ist.

Für beliebiges $\cos\varphi$ gilt:

$$T = 2\pi \frac{u}{60} \sqrt{\frac{2 g \pi \Theta}{n E_k J_k \left(\cos\varphi + \frac{J}{J_k} \sin\varphi\right)}}. \quad \ldots \quad (96)$$

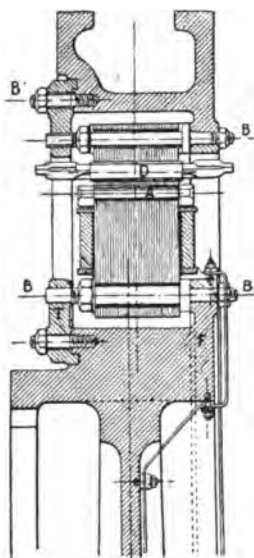


Fig. 381.

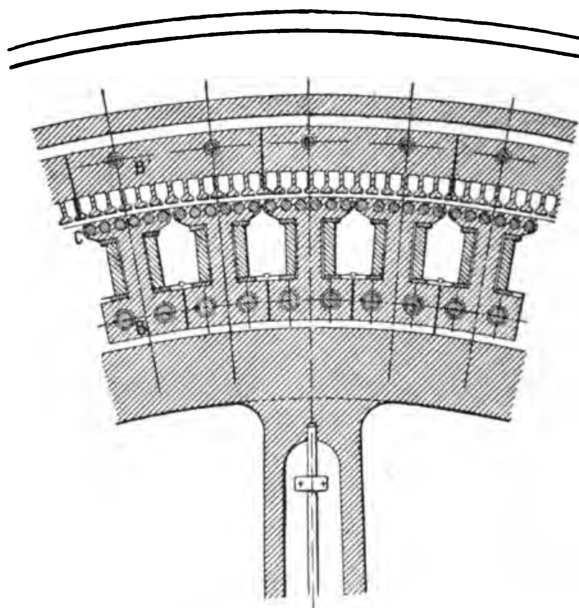


Fig. 382.

Bei Zweiphasenmaschinen ist E_k zu ersetzen durch $2 E_k$ und für drei Phasen durch $\sqrt{3}\ E_k$, wenn E_k die Spannung zwischen zwei Klemmen und J_k der Kurzschlussstrom pro Leitung ist.

Die Schwingungsdauer der Antriebsmaschine ist für eine m-Cylindermaschine

$$T_a = \frac{60}{m \cdot u}. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (97)$$

Die Amplitude der aus T und T_a resultierenden Schwebungen ist um so grösser, je grösser

$$\frac{T_a^2}{T^2 - T_a^2}.$$

Es ist also anzustreben, die Werte T und T_a möglichst verschieden zu halten. Ausser den erwähnten Schwingungen treten noch Schwingungen durch die periodische Torsion der Maschinenwelle auf, die zu

der Eigenschwingung der Dynamo zu schlagen sind. Die zugehörige Schwingungsdauer ist im allgemeinen wesentlich kürzer als T und T_a, so dass die Dämpfung diese Schwingungen sehr kräftig vermindert.

Die Schwingungsdauer T ist abhängig von der Last; sie kann um etwa 25 Proc. zwischen Leerlauf und Volllast abnehmen, sofern es sich um Maschinen mit grosser Rückwirkung handelt.

Neben dem Mittel, T von T_a möglichst verschieden zu halten, giebt es noch eine andere Möglichkeit, das Pendeln zu reduzieren, nämlich eine künstliche Dämpfung. Die Amplitude der Schwebungen ist nämlich bei Dämpfung von einem Ausdruck § 207. Dämpfung.

$$\frac{1}{c\,(T^2 - T_a^2) + c_d\,T_a^2}$$

abhängig, wo c_d die Grösse der Dämpfung angiebt. Die Dämpfung kann in kurzgeschlossenen Windungen auf den Polen bestehen; massive Pole dämpfen schon an sich und haben deshalb ihre gute Berechtigung. LEBLANC hat besondere Wicklungen (amortiseurs) in den Polschuhen angeordnet, die sehr wirksam sind: Fig. 381 u. 382. Dieselben bestehen aus Kupferstäben, die in die lamellierten Polschuhe eingelegt und vorn und hinten durch kräftige Ringe kurzgeschlossen sind. In diesen Stäben werden bei jeder Pendelung intensive Ströme erzeugt, die die Oscillationen dämpfen. Diese Dämpfer nehmen auch Ströme auf, die durch schwankende Netzbelastung hervorgerufen werden.

57. Hintereinanderschaltung zweier Wechselstrommaschinen.

Kuppelt man zwei Wechselstrommaschinen mechanisch so, dass ihre Spannungen $E_1 \sin \omega t$ und $E_2 \sin (\omega t + \varphi)$ nur um einen kleinen Winkel φ verschoben sind, so ergiebt sich eine Resultierende, die den Widerstand w und die Selbstinduktion L des Stromkreises N (Fig. 383) zu überwinden hat. Die resultierende elektromotorische Kraft OA (Fig. 384) zerlegt man in § 208. Theorie der Hintereinanderschaltung.

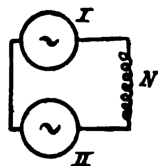


Fig. 383.

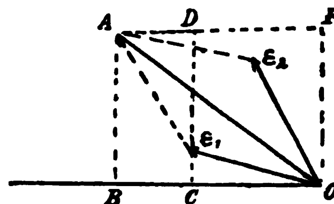


Fig. 384.

eine Komponente $OB = wJ$ in der Stromrichtung und eine senkrecht dazu $AB = 2\pi n L J$. Die von der voreilenden Maschine abgegebene Arbeit ist proportional dem Rechteck $ABCD$, die der nacheilenden dem Rechteck $CDFO$. Ist $\varphi = o$, so sind die beiden Arbeiten gleich, mit steigendem φ wird die Arbeit der voreilenden Maschine kleiner, die der nacheilenden grösser. Löst man also die mechanische Kupplung, so wird bei diesen Verhältnissen folgendes eintreten: Da die Arbeit der zurückbleibenden Maschine mit φ immer grösser wird, so bleibt sie immer mehr zurück und die andere wird

immer mehr voreilen, da sie entlastet wird, und zwar wird das solange dauern, bis $\varphi = \pi$ ist und dann laufen die Maschinen parallel. Eine Hintereinanderschaltung von Wechselstrommaschinen ist also im allgemeinen nur bei zwangsläufiger Kupplung möglich. Diese Tendenz lässt sich auch aus den nachstehenden Gleichungen ersehen. Die Leistung der zurückbleibenden Maschine ist:

$$\tfrac{1}{2}\,\frac{E_1 E_0}{(w^2+\omega^2 L^2)}\left\{w\cos\left(\frac{\varphi}{2}+\beta\right)-\omega L\sin\left(\frac{\varphi}{2}+\beta\right)\right\},$$

die der voreilenden:

$$\tfrac{1}{2}\,\frac{E_2 E_0}{w^2+\omega^2 L^2}\left\{w\cos\left(\frac{\varphi}{2}-\beta\right)+\omega L\sin\left(\frac{\varphi}{2}-\beta\right)\right\},\quad\quad (98)$$

wobei

$$E_0^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2\,E_1 E_2 \cos\varphi,$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{E_2 - E_1}{E_2 + E_1}\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}.$$

Ein Hintereinanderschalten ist auch möglich, wenn in den Leitungen soviel Kapazität liegt, dass der Strom der resultierenden elektromotorischen Kraft OA (Fig. 384) voraneilt, dann hat nämlich die voreilende Maschine den grösseren Teil der Leistung zu liefern. Boucherot hat verschiedene Anordnungen für stabile Hintereinanderschaltung gegeben, die in den Fig. 385 bis 389 skizziert sind. C bezeichnet einen Kondensator, N das Netz, s eine Selbstinduktion.

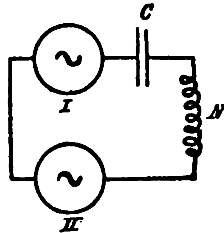


Fig. 385.

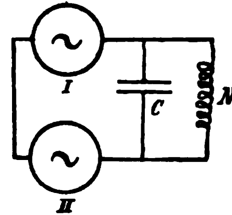


Fig. 386.

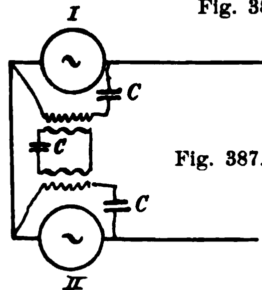


Fig. 387.

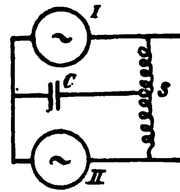


Fig. 388.

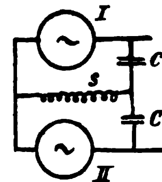


Fig. 389.

§ 209. Hintereinanderschaltung nach Steinmetz. Eine besondere Hintereinanderschaltung hat neuerdings Steinmetz angegeben. Er schaltet z. B. drei Maschinen mit gleicher elektromotorischer Kraft E hintereinander und nimmt die Leitungen an den drei Verbindungspunkten ab. Die mechanisch ganz unabhängigen Maschinen stellen sich dann so ein, dass in den drei Leitungen Dreiphasenströme fliessen. Die drei Maschinen können unabhängig reguliert werden. Es lassen sich auch drei elektromotorische Kräfte E, $\sqrt{2}\,E$, E oder E, $E\sqrt{3}$, E kombinieren. Bei vier Maschinen ist die Kombination an sich unbestimmt.

G. Der Induktionsgenerator.

58. Der Induktionsgenerator.

§210. Theoretisches über den Induktionsgenerator.

Der asynchrone Mehrphasenmotor arbeitet nur solange als Motor, als sich seine Geschwindigkeit zwischen 0 und der Cykelzahl der zugeführten Wechselströme bewegt. Wird die Induktionsmaschine rückwärts angetrieben oder über Synchronismus gebracht, so arbeitet sie als Generator; im ersten Falle allerdings nur als Bremse, die den ganzen Effekt in sich verbraucht, im zweiten als nutzleistender Apparat. In Fig. 390 sind nach Steinmetz

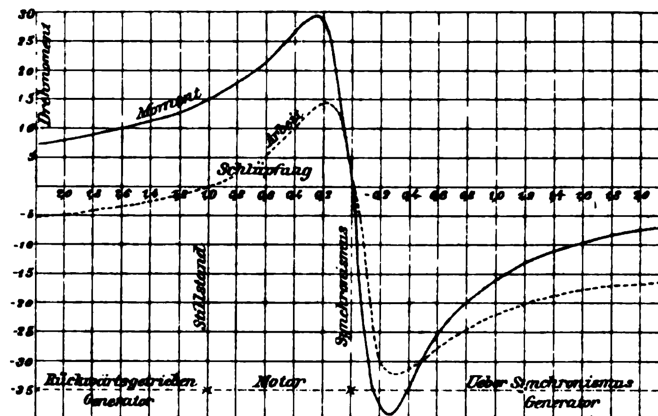


Fig. 390.

die verschiedenen Zustände einer Induktionsmaschine graphisch dargestellt. Als Abscissen ist die Schlüpfung des rotierenden Teils gegenüber Synchronismus, als Ordinaten einmal die sekundliche Arbeit, dann das Drehmoment aufgezeichnet.

Die Theorie des Induktionsgenerators ist identisch mit derjenigen des Induktionsmotors; mit dem Unterschied, dass die Schlüpfung negativ zu setzen ist, wobei nur der Zustand über Synchronismus in Betracht zu ziehen ist, der Rückwärtsbetrieb ist praktisch von geringer Bedeutung. Die Betriebskurven eines Induktionsgenerators sind in Fig. 391 niedergelegt und stimmen völlig mit denjenigen für den Motor überein. Die Geschwindigkeit nimmt

allerdings mit der Belastung zu, nicht ab. Der Induktionsgenerator kann nur auf Netze arbeiten, die bestimmte Phasenverhältnisse besitzen, da er einen cos φ besitzt, der bei jeder Belastung anders ist. Er ändert seinen Strom und seine Belastung solange, bis sein Leistungsfaktor mit dem Netz - cos φ übereinstimmt.

Der Induktionsgenerator unterscheidet sich von dem gewöhnlichen Wechselstromgenerator im wesentlichen dadurch, dass er keine eigentliche bestimmte Frequenz hat. Er kann bei jeder beliebigen Frequenz über Synchronismus arbeiten. Elektrische Energie kann er nur dann erzeugen, wenn er sich in einem Stromkreise mit einem Wechselstromapparat von bestimmter Frequenz befindet, z. B. einer gewöhnlichen Wechselstrommaschine oder einem Synchronmotor; er erfordert eine besondere Vorrichtung zur Festlegung seiner Frequenz, wenn er überhaupt arbeiten soll.

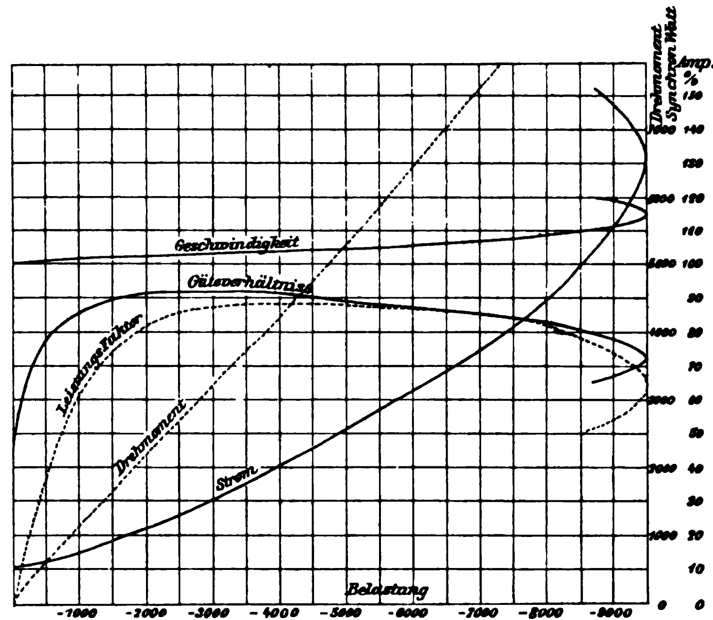


Fig. 391.

Bei Parallelbetrieb mit gewöhnlichen Wechselstrommaschinen hängt das Phasenverhältnis des Stromes, der aus dem Induktionsgenerator kommt, ausser von der Schlüpfung, hauptsächlich von der Selbstinduktion des Induktionsgenerators ab. Der Induktionsgenerator ist daher zur Regulierung der Phasenverschiebung in einem Wechselstromkreise verwendbar.

Im Falle der Hintereinanderschaltung in einem Stromkreise ist die elektromotorische Kraft des Induktionsgenerators annähernd proportional dem Strom. Daher kann er als Zusatzmaschine gebraucht werden, um einer Leitung eine höhere Spannung zu erteilen, die proportional dem durch sie fliessenden Strom ist.

Asynchrone Generatoren brauchen keine Gleichstromerregung, häufig nicht einmal Schleifringe, sind unabhängig von der Antriebsgeschwindigkeit, bei Kurzschluss gehen sie einfach aus, ihre Maximalleistung ist grösser als bei der Arbeitsweise als asynchroner Motor (Fig. 390).

§ 211. Betriebskurven des Induktionsgenerators.

McKissick hat an einem fünfpferdigen Induktionsgenerator eine Reihe Kurven aufgenommen, von denen einige nachstehend wiedergegeben sind. In Fig. 392 arbeitet der Induktionsgenerator auf einen Synchronmotor, dessen Erregerstrom variiert wird und als Abscissen aufgetragen ist. Die Kurve *A* ergiebt den Hauptstrom in Abhängigkeit des Erregerstromes, *B* den Hauptstrom in Funktion der Klemmenspannung und *C* ist der Leistungsfaktor. In Fig. 393

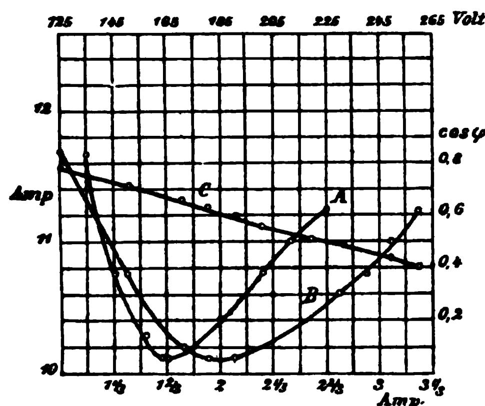


Fig. 392.

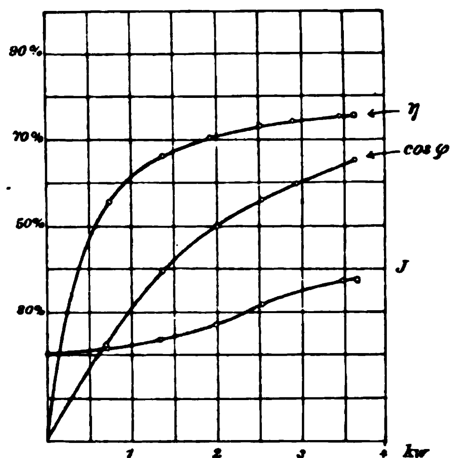


Fig. 393.

ist für diesen Fall der Wirkungsgrad η, der cos φ und der Hauptstrom *J* dargestellt. In Fig. 394 ist die Induktionsmaschine mit Glühlampen belastet, während der Synchronmotor leerläuft. *A* ist der Wirkungsgrad, *B* der cos φ, *C* die Stromstärke in Abhängigkeit der abgegebenen Leistung. In Fig. 395 arbeiten eine gewöhnliche Wechselstrommaschine und der Induktionsgenerator parallel auf

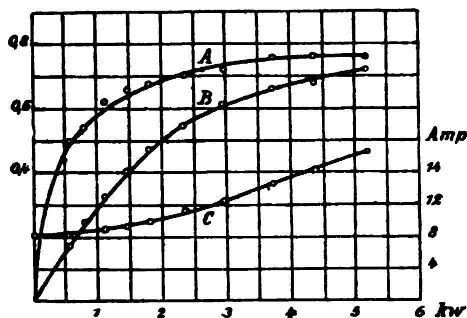


Fig. 394.

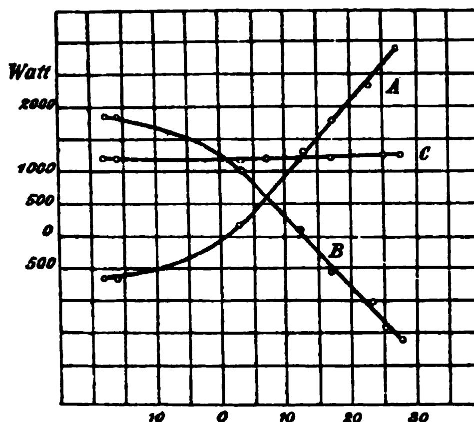


Fig. 395.

Glühlampen. *A* ist die Leistung des Induktionsgenerators in Abhängigkeit der Tourenzahl, die mit dem Synchronismus als Nullwert anhebt, *B* die Leistung des gewöhnlichen Generators, *C* der an die Lampen abgegebene Effekt. Die Wirkungsweise als Zusatzdynamo zeigt Fig. 396. Mit zunehmender Stromstärke steigt die Zusatzspannung fast geradlinig (Kurve *A*) und ebenso die Netzspannung (Kurve *B*). Die elektromotorische Kraft des

asynchronen Generators ändert sich mit der Tourenzahl gemäss Fig. 397. Beim Synchronismus findet ein Spannungssprung statt. Der Generator war hierbei als Zusatzmaschine geschaltet, der Netzwiderstand und die Hauptspannung blieben konstant. Die Netzspannung = Hauptspannung + Zusatzspannung ändert sich mit der Tourenzahl (Abscissen) nach Fig. 398 Kurve *A* und der Strom nach Kurve *B*.

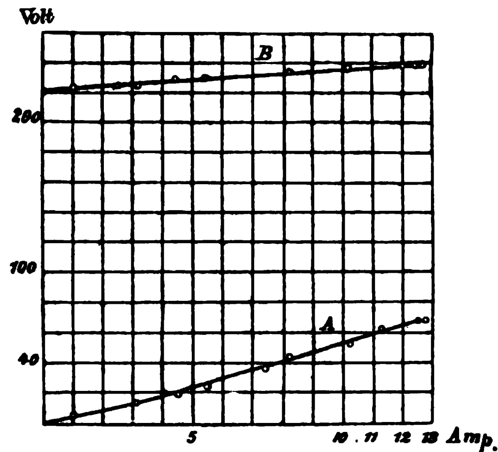


Fig. 396.

§ 212. Induktionsgenerator nach Bradley.

In Fig. 399 u. 400 ist die Schaltung eines Induktionsgenerators nach BRADLEY gezeichnet. Der äussere Teil liegt am Netz, der rotierende Teil ist über regulierbare Kapazitäten an den Anker einer gewöhnlichen Drehstrom-

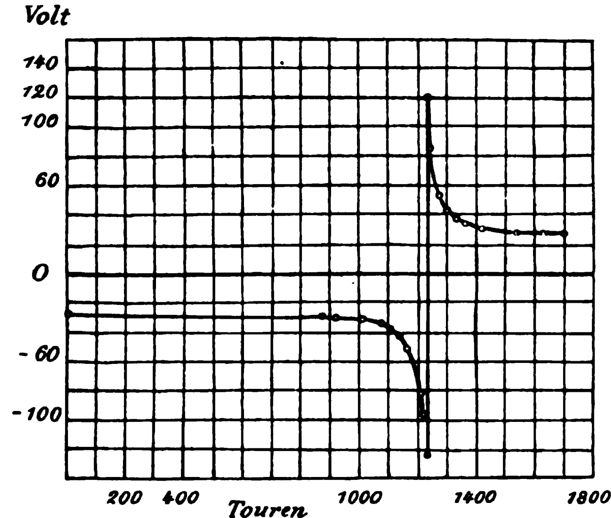


Fig. 397.

maschine mit Gleichstromerregung angeschlossen. Das Anlassen dieser Maschine, die Motoren speist, welche stets alle zusammen mit dem Generator in Betrieb genommen werden, geschieht derart, dass der Induktionsgenerator samt der erregenden Drehstrommaschine auf volle Tourenzahl gebracht wird. Die Periodenzahl, mit der der rotierende Teil des asynchronen Generators

gespeist wird, ist dann gleich seiner Umdrehungszahl; es wird also primär nicht induziert. Nun wird gleichzeitig mit der Verschiebung des Kapazitätregulators durch konische Trommeln die Geschwindigkeit, d. h. die Frequenz der Drehstromerregermaschine vermindert, so dass die Frequenz des rotierenden Teils zurückbleibt. Nach Massgabe dieser Schlüpfung wird im Netzstromkreis induziert. Die Kapazität soll, wie gleich noch erörtert wird, die Erzeugung wattloser Ströme ermöglichen.

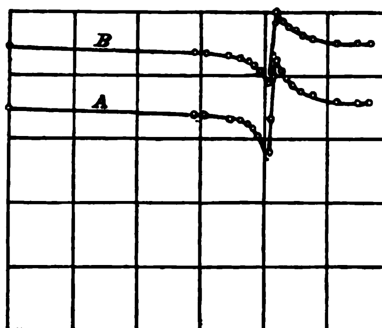
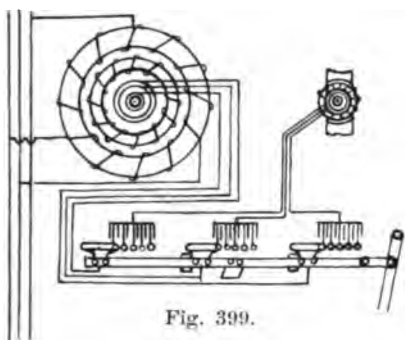
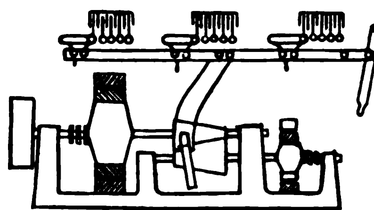


Fig. 398.

Die Kapazität wird wohl auch in den Primärkreis geschaltet, so dass der rotierende Kreis in sich geschlossen werden kann. Der gleichstromerregte Generator liegt dann parallel zur feststehenden Wicklung der Induktionsmaschine.

Da die Induktionsmaschine mit geschlossenem Sekundärkreis oder, wenn letzterer auf Widerstand oder Selbstinduktion geschlossen ist, nur Wattströme in ein Netz liefern kann, hat LEBLANC verschiedene Verfahren angegeben, § 218. Induktionsgenerator nach Leblanc.


Fig. 399.


Fig. 400.

um ihr auch wattlose Ströme entnehmen zu können. In gleicher Weise verleihen diese Mittel dieser Maschinengattung in Hintereinanderschaltung mit gewöhnlichen Generatoren auch die Fähigkeit elektromotorische Kräfte zu erzeugen, die senkrecht zum Strome stehen, während sie an und für sich nur phasengleiche Spannungen erzeugen können. Zu diesem Zwecke muss der Selbstinduktionskoeffizient des induzierten Teiles auf Null und weniger vermindert werden. Dieser letztere kann in diesem Falle nicht in sich kurzgeschlossen sein und wird im allgemeinen Schleifringe zur Aussenleitung besitzen. Man kann dieselben allerdings dadurch vermeiden, dass man die Maschine aus zwei Induktionsmotoren A und B in Kaskadenschaltung bestehen lässt (Fig. 401). Die Wicklung von CC liegt am Netz, die induzierte Wicklung DD ist auf FF direkt geschlossen, DD und FF rotieren. FF induziert in EE wieder, welche Wicklung feststeht und entsprechend reguliert wird. Das Ganze funktioniert principiell wie eine einzige Induktionsmaschine.

Ist der Selbstinduktionskoeffizient des induzierten Teiles an sich L, so wird derselbe beim Einschalten eines Kondensators von der Kapazität C

$$L' = L - \frac{1}{4\pi^2 n_s^2 C} \quad \quad (99)$$

n_s ist die Periodenzahl der Ankerströme, d. h. die absolute Schlüpfung. Als Kondensatoren empfehlen sich elektrolytische Zellen, die gerade für niedrige Periodenzahl und Niederspannung sich ganz gut eignen.

LEBLANC giebt jedoch noch andere Mittel an, um den Selbstinduktionskoeffizienten zu verringern:

1. eine besondere Erregermaschine,
2. einen schwingenden Apparat (récupérateur).

Die erste Einrichtung ist in Fig. 402 skizziert. Sie besteht aus zwei Gleichstrommaschinen auf einer Achse. Die eine Wicklung S des induzierten Teiles der Induktionsmaschine ist auf die eine Erregerwicklung J, den Anker A und die Erregerwicklung I' der andern Erregermaschine geschlossen. Die Wicklung C der Induktionsmaschine, die senkrecht zu S liegt, schliesst sich über die Wicklung J', den Anker A' und die Spule I. Die Erregung der beiden Gleichstrommaschinen erfolgt also je durch zwei um

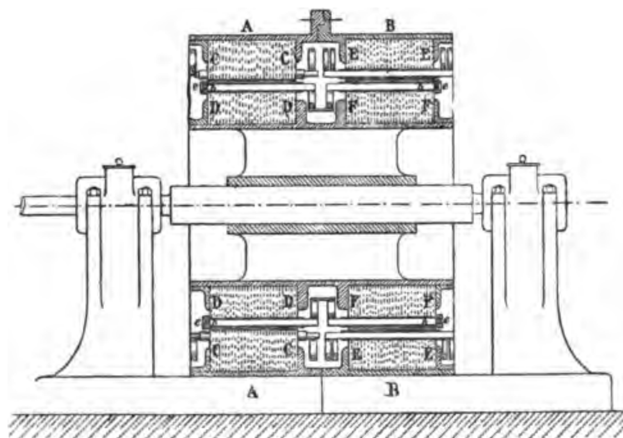


Fig. 401.

90^0 versetzte Wicklungssysteme, deren Ströme ebenfalls um 90^0 verschoben sind. Die Wirkung dieser Erregermaschine bezüglich Neutralisierung der Maschinenselbstinduktion ist abhängig von der Schlüpfung der Induktionsmaschine.

Der zweite Apparat ist nichts anderes als eine Art Galvanometerspule (Fig. 403), die innerhalb eines konstanten Magnetfeldes rotiert. Die Spule wird an den induzierten Teil des asynchronen Generators angeschlossen und dadurch in schwingende Bewegung versetzt. Der Selbstinduktionskoeffizient wird bei dieser Bewegung

$$L' = L - \frac{c \cdot B^2}{n_s \Theta}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (100)$$

falls L der Selbstinduktionskoeffizient der Spule an sich, B die Felddichte, n_s die Periodenzahl des Wechselstromes, der die Spule durchfliesst, Θ ihr Trägheitsmoment ist. Technisch wird der Apparat nach Fig. 404 ausgeführt, wobei sich eine Kupferscheibe ab in einem durch die Erregerspule M geschaffenen Feld oscillierend einige Touren vor- und rückwärts dreht. Die Stromführung zur Scheibe geschieht durch die Achse xy und am Rande durch

Quecksilber. Die Wirkungsweise hängt von der Frequenz der speisenden Wechselströme ab.

Die Arbeitsweise von Induktionsmaschinen, die mit einer der genannten Einrichtungen zur Erzeugung wattloser Ströme ausgerüstet sind, gestaltet sich folgendermassen:

Bei Parallel- oder Hintereinanderschaltung mit einem gewöhnlichen Generator *G* für konstante Klemmenspannung oder konstanten Strom bei festgelegter Frequenz, ohne den diese Induktionsmaschinen *J* nicht funktionieren können, belastet man letztere immer voll, indem man sie entsprechend dem Bedarf zu- und abschaltet; nur die Belastung des gewöhnlichen Generators ist zwischen Null und Volllast variierbar einzurichten. Auf diese Weise ist eine Regulierung der Erregermaschinen bezw. überhaupt des induzierten Kreises der Induktionsmaschinen nicht erforderlich; Bedingung ist nur, dass

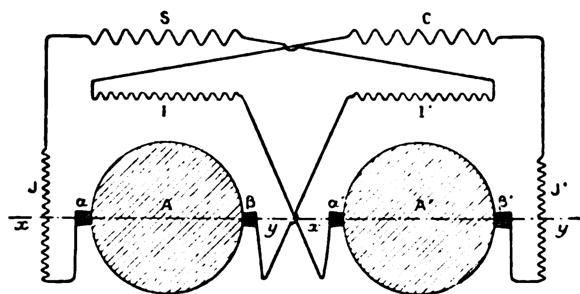


Fig. 402.

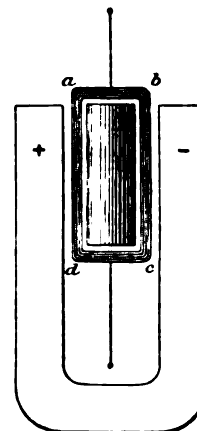


Fig. 403.

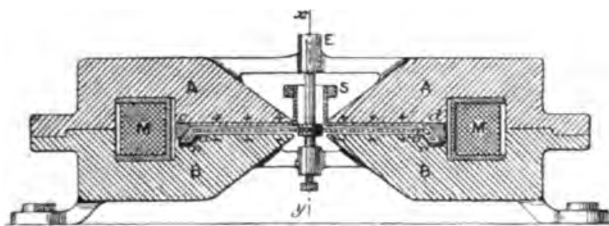


Fig. 404.

dieselben um einen betimmten Betrag $n' - n$ rascher laufen als der gleichstromerregte Generator, auch wenn n etwas schwankt. Die Kraftabgabe des asynchronen Generators steigt mit der Zunahme von $n' - n$ und ist bei $n' - n = o$ ebenfalls Null. Der Dampfzufluss sollte so eingerichtet sein, dass die Dampfmaschine an den Generator *J* kein grösseres Moment abgeben könnte, als der festgelegten Volllast und damit $(n' - n)_{max}$ entspricht. Die Dampfmaschine braucht mit gar keinem Regulator versehen zu sein, wenn nur dafür gesorgt ist, dass eine bestimmte grösste Dampfzufuhr nicht überschritten werden kann, die der Maximalleistung des Generators *J* entspricht. Der letztere wird dann einfach bei Parallelschaltung mit dem üblichen Wechselstromgenerator *G* solange rascher laufen, bis er seine Volllast (Maximallast) hat und wird damit jenen entlasten, so dass jener nur die Differenz zwischen Netzbelastung und Volllast des Induktionsgenerators zu liefern hat. Der gleichstromerregte Generator allein muss also mit einem Geschwindigkeitsregulator versehen sein. Das Zuschalten der Induktionsmaschine an das Netz

erfolgt ohne Rücksicht auf Synchronismus einfach über eine kleine abschaltbare Drosselspule. Immer wenn der Generator *G* Volllast zeigt, wird wieder eine Induktionsmaschine *J* eingeschaltet oder, wenn seine Last Null ist, eine Induktionsmaschine *J* abgeschaltet. Wenn der cos φ variiert, so muss der induzierte Kreis von *J* reguliert werden, was bei der besprochenen Erregermaschine durch Hinzufügen einer Drosselspule geschehen kann, bei dem schwingenden Apparat durch Änderung der Felddichte *B*. Damit plötzliche Änderungen des cos φ nicht störend wirken, muss der Generator *G* so gross gewählt werden, dass er die grösste Änderung, die je vorkommt, aufnehmen kann.

Die behandelte Regulierung der induzierten Kreise gestattet es, den Luftzwischenraum, der an sich sehr klein zu halten wäre, beliebig gross zu wählen, was besonders bei grossen Abmessungen der Maschinen schätzenswert ist; ferner kann man ohne Rücksicht auf cos φ so disponieren, dass die Materialien am günstigsten ausgenutzt werden.

H. Mechanischer Aufbau.

59. Ankeraufbau.

Der Anker fast aller modernen Wechselstrommaschinen besteht aus Weicheisenscheiben von 0,5 bis 0,3 mm Dicke. Es ist wohl kaum je ökonomisch, unter 0,5 bis 0,4 mm Dicke zu gehen, da die dadurch bei 50 Perioden erzielte geringe Verminderung der Wirbelströme in keinem Verhältnis steht zu den Mehrkosten und namentlich zu dem Mehrvolumen, das durch die Isolation §214. Ankerbleche.

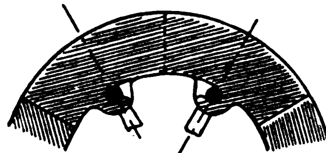


Fig. 405.

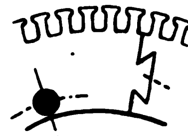


Fig. 406.

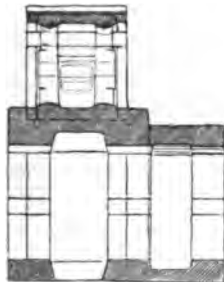


Fig. 407.

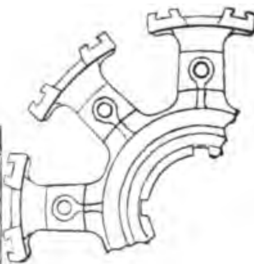


Fig. 408.

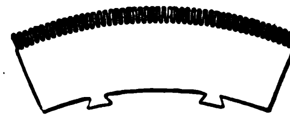


Fig. 409.

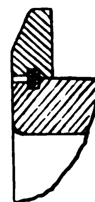


Fig. 410.

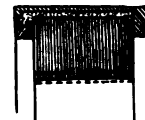


Fig. 411.

beansprucht wird[1]). Zur Verminderung der Wirbelströme empfiehlt es sich, in gewissen Abständen dicke Papierzwischenlagen einzufügen; die Ventilationskanäle wirken in gleichem Sinne. Bei grossen Durchmessern (über 1,1 m)

1) Die Bleche werden entweder durch Oxydschichten, Wasserglas oder Papier von 0,04 bis 0,06 mm Dicke (aufgeklebt oder zwischengelegt), oder irgend einen andern dünnen schlechten Leiter, wozu z. B. auch Graphit in diesem Falle gehört, gegenseitig isoliert. Der nützliche Eisenquerschnitt ist deshalb nur 0,85 bis 0,92 des totalen.

bestehen die Ankerbleche nicht mehr aus einem Ring, sondern aus Segmenten[1]) (Fig. 405 u. 406)[2]), die sich je abwechselnd in der Trennungsfuge überdecken. Bei Fig. 406 sind die einzelnen Segmente hart verlötet. Die Bleche werden durch Bolzen zusammengehalten, die innerhalb oder ausserhalb der eigentlichen Bleche verlaufen können. Bei rotierenden Ankern, die in Europa nur für niedere Spannungen und geringe Leistungen, in Amerika in ausgedehntem Maasse verwendet werden, lassen sich die Bleche auf einen Armstern aufschieben (Fig. 407—409).[3]) Die Westinghouse Co. bringt zum Zusammenhalten der Bleche Nuten an (Fig. 410), die ausgegossen werden, sodass Bolzen überflüssig sind. In Fig. 411 ist in ähnlicher Weise ein ganzer Ring ausgegossen. Nur bei sehr kleinen Maschinen ist es möglich, die Bleche direkt auf die Achse zu setzen, ein Speichenrad ventiliert jedoch stets besser, auch die Welle wird weniger beansprucht. In Flachringankern besteht der Kern aus aufgewickeltem Eisenband in der Form einer Torsionsfeder. Besondere Stanzstücke in Form von Polankern, ebenso Eisendraht für Ankerkerne, sind veraltet.

§ 215. Ankerwicklungen. Die Wicklungen werden neuerdings fast ausschliesslich in Nuten[4]) der verschiedensten Form verlegt. Zur Verminderung der Streuung sollten dieselben möglichst breit und wenig tief sein, doch darf die Zahndicke aus Gründen der Festigkeit und wegen der Hysteresis und Wirbelströme, je nach der Maschinengrösse, nicht unter 2 bis 5 mm sinken. Sind die Nuten ganz, oder beinahe geschlossen, oder werden geschlossene Hülsen verwendet, so müssen die Drähte (Fig. 412) oder Litzen (Kabel) oder Stäbe (Fig. 413[5]) u. 414) von der Seite eingezogen werden, was bei vielen Windungen sehr zeit- und raumraubend ist, bei Stabwicklung allerdings äusserst einfach ausfällt. Bei ganz oder doch weit offenen Nuten kann von oben herein gewickelt werden (Fig. 415—421), ja es kann bei Drahtwicklung eine ganze Schablone auf der Drehbank fertig gewickelt[6]) und eingelegt werden (Fig. 422), wodurch eine hohe Isolation gesichert wird. Bei Hochspannungsmaschinen werden die Nuten an sich mit Röhren aus Glimmer oder Mikanit in Stärken bis 10 mm ausgefüttert (Fig. 412). Bei Hochspannung nimmt also die Isolation viel Wickelraum weg und reduziert die Leistung einer Type um so mehr, je kleiner sie ist. Dies ist der Grund, warum kleine Typen nicht für beliebig hohe Spannungen gebaut werden können.

Die Wicklungen in ganz offenen Nuten werden auf dem rotierenden Anker durch Bandagen festgehalten. Unter den Drahtbandagen liegt zunächst ein Band aus Isolationsmaterial. Der Bindedraht ist zum Schluss möglichst durch ein besonderes Schloss (Fig. 423) zu schliessen, und so

---

1) Um die grossen Blechtafeln möglichst wirtschaftlich auszunützen, ist es zweckmässig, die Segmente nicht nach konzentrischen Kreisen, sondern nach Kreisen von gleichem Radius auszuschneiden. Die Segmente sind 0,7—2 m lang.

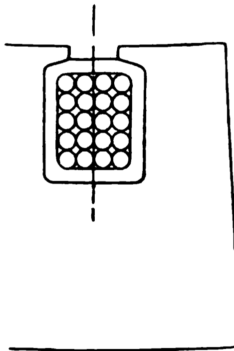
2) Nach FISCHER-HINNEN.

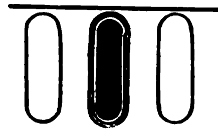
3) WALKER Co.

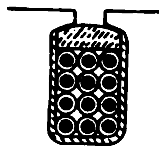
4) Das Aufschlitzen der wenig offenen Nuten sollte durch transportable Fräsmaschinen geschehen; auch für das Ausrichten der mit der Stanze hergestellten Löcher empfehlen sich Spezialmaschinen mit Feil- oder Raspelvorrichtungen. Dieses Ausrichten vergrössert den Wickelraum in nennenswerter Weise.

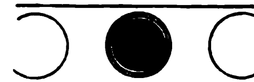
5) Verschiedene der Nutenformen sind dem Werke „Die Ankerwicklungen“ von ARNOLD entnommen.

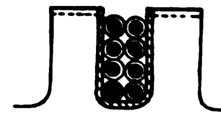
6) Diese sogenannten Schablonenwicklungen besitzen die Vorteile, dass ihre Kühlung und Isolation besser ist als die anderer Wicklungsarten; Reparaturen sind auch leichter möglich.

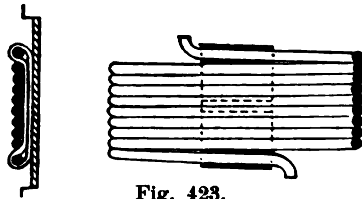

Fig. 412.

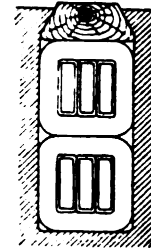

Fig. 413.

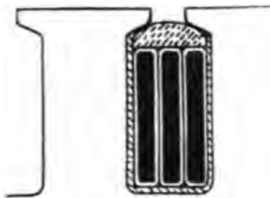

Fig. 416.

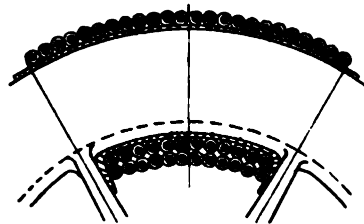

Fig. 414.


Fig. 415.


Fig. 423.


Fig. 420.


Fig. 417.


Fig. 424.

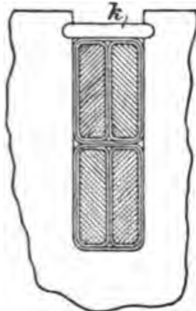


Fig. 421.

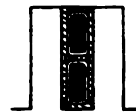
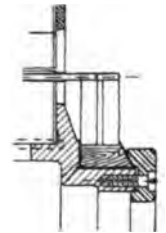

Fig. 418.


Fig. 425.


Fig. 428.

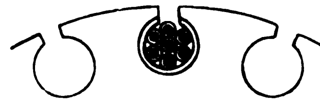

Fig. 419.



Fig. 422.

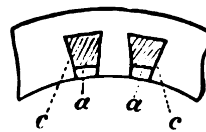
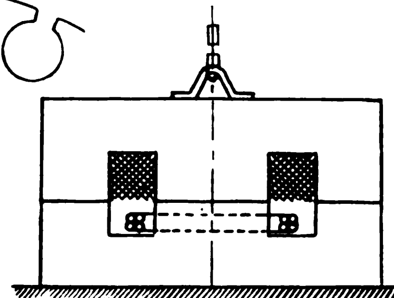
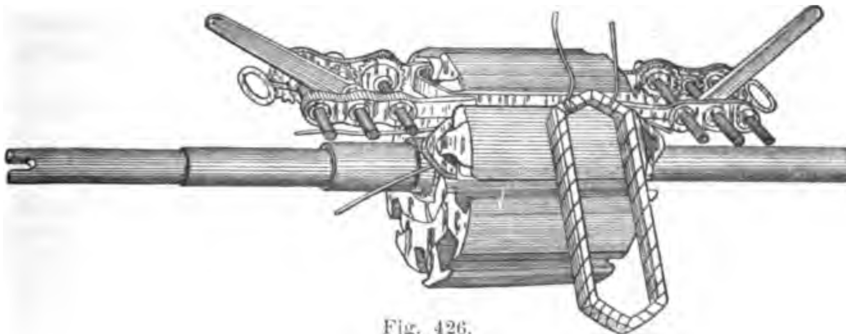


Fig. 423 a.


Fig. 427.


Fig. 426.

wenig als möglich zu verlöten[1]). In halbgeschlossenen Nuten kann die Wicklung bequem durch Keile festgelegt werden (Fig. 417); für Stabwicklung ist dies auch bei offenen Nuten in Fig. 421 geschehen. Bei geschlossenen Nuten oder zugespitzten Nuten (Fig. 423 a) ist keine besondere Befestigung erforderlich. Ein Ringanker ohne Nuten ist in Fig. 424 skizziert; manchmal werden dabei die Drähte am äusseren Umfang in Nuten versenkt. Glatte Anker finden sich wohl auch mit fertig gewickelten aufgelegten Spulen aus Flachkupfer. In Nuten von der Form Fig. 425 werden öfters zwei Spulenseiten zweier Spulen gelegt, wozu ein Wickelapparat nach Fig. 426[2]) benutzt werden kann: Die Spulen werden eingelegt, haben jedoch eine grössere Breite, als von Nutenwand zu Nutenwand, sodass sie in die Nuten eingeschoben werden können, dann werden sie durch den gezeichneten Quetschapparat zusammengepresst, bis sie an den Nutenwänden anliegen. Die fertig gewickelten Spulen werden einzeln in einem Versuchstransformator (Fig. 427) mit doppelter Maschinenspannung probiert.

Die Zähne der Nutenanker müssen seitlich gut gefasst werden, besonders wenn Ventilationskanäle vorgesehen sind, da sie sonst aufblättern und brummen, heulen oder pfeifen. Man kann zur Verhinderung dieser Erscheinung z. B. die starken Endscheiben ebenfalls mit Zähnen versehen oder die Zähne mit Band umwickeln. — Der tangentielle Zug auf die Leiter in den Nuten ist in Kilogramm:

$$\frac{B_n\, l\, i}{9{,}81 \cdot 10^6}, \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (101)$$

wenn B_n die Induktion in der Nute, i der Strom, l^{cm} die Leiterlänge ist; B_n ist in der Regel nur $^1/_{100}$ bis $^1/_{1000}$ der Zahninduktion.

Bei Stabwicklung werden die Endverbindungen entweder als Seiten- (Fig. 189) oder als Fasswicklung (Fig. 187) ausgeführt und entweder durch Bandagen oder z. B. durch Pressringe (Fig. 428, A. E. G.) festgehalten. Schablonenwicklung mit Drähten wird meist als Fasswicklung ausgeführt. Litze (Kabel) lässt sich leichter wickeln als dicker Draht, es ist aber 70 bis 80 Proc. mehr Wickelraum nötig. Bei Hochspannung sind die Endverbindung luftig auszuführen, sodass überall genügend Abstand vom Gestell vorgesehen ist. Es ist ganz rationell, eine Maschine so zu bemessen, dass auch beim Ausbrennen einer Spule noch ein Betrieb möglich ist, was aber nicht auf Kosten eines allzugrossen Spannungsabfalls geschehen sollte. Eine amerikanische Maschinentype „La Roche" soll noch betriebsfähig sein, wenn die Hälfte aller Spulen ausgebrannt ist.

§ 216. Isolationsmaterialien.

Die Isolationsmaterialien spielen in der Wechselstromtechnik eine ganz hervorragende Rolle: Dieselben sind von verschiedenen Gesichtspunkten aus zu betrachten und zwar kommt erstens ihre elektrische Isolationsfähigkeit in Frage, dann der Einfluss der Erwärmung, die hygroskopischen Eigenschaften und die mechanische Festigkeit. In jeder Hinsicht das beste Material ist

1) Die Zugkraft, die auf den gesamten Bandagenquerschnitt (einfach gerechnet) wirkt, ist nach FISCHER-HINNEN:

$$Z q l D u^2 \frac{0{,}83}{10^{10}} \text{ kg},$$

wenn Z gesamte Leiterzahl, q der Leiterquerschnitt in Quadratcentimeter, l die Leiterlänge in Centimeter, D der Durchmesser in Centimeter, u die Umdrehungszahl ist. — Die Firma A. E. G. vorm. LAHMEYER & Co. schützt die Wicklung gegen die Zentrifugalkraft durch aufgeschraubte Segmente aus Vierkantkupfer.

5) Nach JACKSON.

Glimmer, es ist nur ziemlich spröde. Ferner wird verwendet Hartgummi, Schiefer, Marmor, Asbest, Vulkanfiber, geöltes Papier und geölte oder schellackierte Leinwand und Pressspahn. Häufig werden auch verschiedene Materialien wie Papier und Glimmer kombiniert, es sind überhaupt viele dünne Lagen einer einzigen Isolationsschicht bei weitem vorzuziehen. Die fertigen Spulen werden mit besonderen Isolierlacken bestrichen und dann längere Zeit in einem Trockenofen bei 60 bis 100° getrocknet.

Reiner Hartgummi[1]) schlägt bei 0,3 mm Dicke bei 19000 Volt und bei 1,0 mm Dicke bei 34000 Volt durch. Eine Kombination von dünnen Schichten Papier und Glimmer von 0,10 mm Dicke schlägt bei ca. 4000 Volt, von 3 mm Dicke bei ca. 14000 Volt durch. Leinwand mit Leinöl getränkt und getrocknet hält bei $^1/_{10}$ mm Dicke 7000 Volt aus, geöltes Papier in gleicher Dicke etwa 5000 Volt. Hartgummi hat Durchschlagswerte von ca. 500 Volt pro 0,03 mm Dicke, wird jedoch bei 80° C. ganz weich. Schiefer ist hygroskopisch und enthält öfters Metalladern, er sollte mit Paraffin gekocht werden; ebenso verhält es sich mit Marmor. Eine Mischung aus Asbest und Gummi (Vulcanasbest) hat offenbar in jeder Hinsicht gute Eigenschaften als Isolationsmaterial. Die Lacke, die zur Isolierung verwendet werden, sollten hohe Hitze ertragen und durch Öl nicht angegriffen werden.

Für die Bemessung der verschiedenen Eisen- und Luftquerschnitte mögen folgende Anhaltspunkte, die sämtlich auf 50 Perioden bezogen sind, dienen: Für das Ankereisen gilt nach früheren $B = 4000$ bis 7000, bei guter Ventilation noch etwas mehr, die Zähne dürfen, wenn sie rechteckig oder trapezförmig und verhältnismässig tief sind, nur mit 8000 bis 11000, wenn es sich aber um runde oder nahezu runde Nuten handelt, mit 14000 bis 18000 im Steg maximal beansprucht werden. In der Luft schwankt die Induktion zwischen 4000 und 10000, in den Polen aus Gusseisen zwischen 6000 und 8500, bei Stahlguss oder Schmiedeisen zwischen 14000 und 17000, die letzteren Werte unter Berücksichtigung der Streuung. Im Joch wird gewöhnlich etwas weniger gewählt: 4000 bis 7000 bei Gusseisen und 10000 bis 14000 bei Stahl oder Schmiedeisen. Die beiden letzteren Materialien haben gegenüber Gusseisen die Eigenschaft, dass ihre Sättigung sich viel plötzlicher bemerkbar macht. § 217. Eisen- u. Luftquerschnitte.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Wechselstrommaschinen ist fast allgemein höher als diejenige der Gleichstrommaschinen, da meist die induzierte Wicklung nicht rotiert, oder wenn sie rotiert, ganz oder halbgeschlossene Nuten verwendet werden. Bei rotierendem Feld beläuft sich die Umfangsgeschwindigkeit, wenn die Pole aufgeschraubt werden, auf 25 bis 40 m, bei der Induktortype sogar bis auf 50 und 60 m. Rotierende Anker zeigen Umfangsgeschwindigkeiten bis 40 m. Diese Werte sind als obere Grenzen zu betrachten, namentlich bei kleineren Modellen findet sich häufig nur etwa die Hälfte. § 218. Umfangsgeschwindigkeit.

60. Feldgestell.

Das Gestell von Aussenpolmaschinen gleicht im wesentlichen demjenigen der Aussenpolgleichstrommaschinen, nur ist die Polzahl bei Wechselstrom in der Regel grösser. Es empfiehlt sich deshalb für das Gestell Stahlguss. § 219. Beispiele von Polen.

1) Nach PARSHALL und HOBART.

Die Pole werden dann mit Polschuhen versehen. Gusseisenmaschinen der Aussenpoltype erhalten meist keine Polschuhe. Bei Innenpolmaschinen ist gewöhnlich der Erregerwickelraum derart beschränkt, dass man fast durchweg zu Stahl- oder Schmiedeisenpolen greift. Diese Beschränkung des Erregerwickelraumes lässt sich dadurch in eleganter Weise umgehen, dass man die rotierenden Pole ausserhalb des Ankers anordnet (siehe unter den Maschinen von Brown, Boveri & Cie.). Die Innenpolmaschinen werden mit massiven Stahlgusspolen versehen, wenn die Ankernuten ganz oder teilweise geschlossen sind. Bei offenen Nuten werden lamellierte Schmiedeisenpole Bedingung. Für die Befestigungsweise der rotierenden Pole haben sich eine Reihe Konstruktionen herausgebildet[1]), von denen einige in Fig. 429—438 skizziert sind. Massive Pole werden fast allgemein mit ein oder zwei Schrauben befestigt, die maschinengewickelten Spulen werden vorher übergeschoben, falls sie nicht ganz direkt auf den Pol gewickelt werden. Es können auch die Pole angegossen und nur Polschuhe aufgeschraubt werden.[2]) Die Polschuhe werden wohl auch aus lamelliertem Material hergestellt und durch Schwalbenschwänze oder durch seitliche Platten und Bolzen festgehalten. Ist der ganze Pol lamelliert, so werden von verschiedener Seite besondere Stanzstücke verwendet, die zwei Pole umfassen und die abwechselnd aufeinander geschichtet werden, sodass die Stossfuge immer versetzt ist. Die Bleche werden wie Ankersegmente durch kräftige Bolzen zusammengehalten (Fig. 433): Die Spulen müssen von Hand gewickelt werden. Fig. 437 stellt ein Innenpolkreuz von Siemens & Halske dar, wobei Bleche, die alle Polvorsprünge enthalten, direkt auf die Achse geschoben sind. Farcot in St.-Ouen hält die geblätterten Pole (Fig. 430) durch zwei Bolzen fest, die halb im Kranz halb im Pole versenkt sind. Der A. E. G. ist die Konstruktion Fig. 429 patentiert: Die Bleche werden zunächst durch Nieten zusammengehalten, in den ebenfalls geblätterten Rückenkranz eingeschoben und durch Keile festgelegt. Fig. 438 zeigt ein Aussenpolgestell der Walker Co. mit geblätterten Polen, die in den Jochring eingegossen werden. Massive Pole sind meist rund oder länglichrund, lamellierte rechteckig.

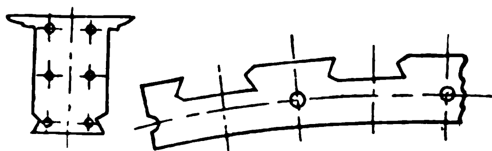
§ 220. Dimensionierung der Pole. Das Verhältnis Polbreite: Teilung ist häufig bei Wechselstrommaschinen kleiner als bei Gleichstrommaschinen, es schwankt zwischen 0,5 und 0,8, liegt jedoch am häufigsten zwischen 0,6 und 0,75. Der Luftzwischenraum schwankt ebenfalls sehr, von 2 mm bei kleinen Maschinen bis 15 mm bei grossen, bei mittleren Maschinen ist 5 bis 8 mm ein sehr gebräuchlicher Mittelwert. An den Rändern wird die Luft grösser, dadurch dass die Pole meist abgeschrägt werden.

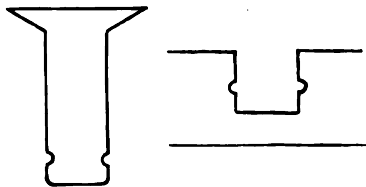
Die Ampèrewindungszahl pro Feldpol beträgt durchschnittlich 4000 bis 10 000. In Fig. 439 ist eine Kurvenschar gegeben, die über die ökonomischste Verteilung von Kupfer und Eisen für die Erregung einigen Aufschluss giebt. Die Ordinaten sind durchweg die Induktion B für Stahlguss. Es ist gezeichnet die B-H-Kurve, 2 das Gewicht des Erregerkupfers, 3 das Gewicht des Stahles, 4 das Gesamtgewicht, 5 die Gesamtkosten, 6 die aufzuwendende Energie zur

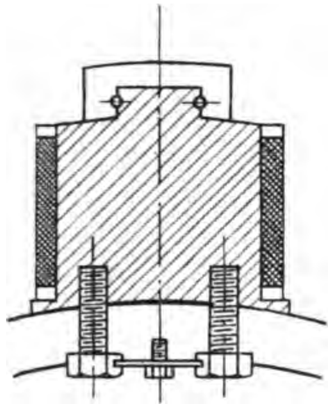
---

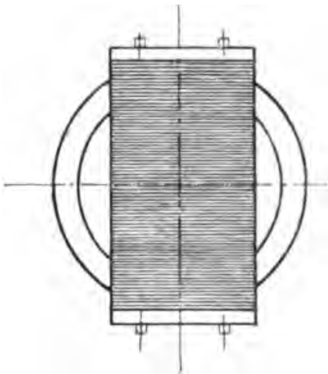
1) Ausführliches Material über diesen Gegenstand ist in den „Konstruktionstafeln für den Dynamobau" von Prof. Arnold sowie in den „Elektromechanischen Konstruktionen" von G. Kapp zu finden.

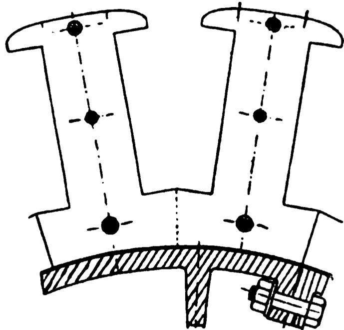
2) Bei aufgeschraubten Polen oder Polschuhen ist es nach Fertigstellung der Maschine noch möglich, den Luftzwischenraum durch Unterlegen von Blechen zu verkleinern.

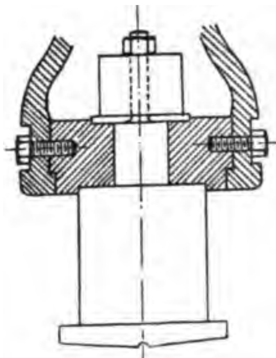

Fig. 429.

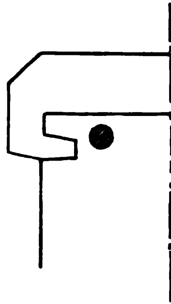

Fig. 430.


Fig. 431.


Fig. 432.


Fig. 433.


Fig. 434.


Fig. 435.

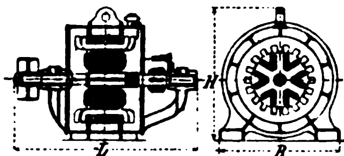
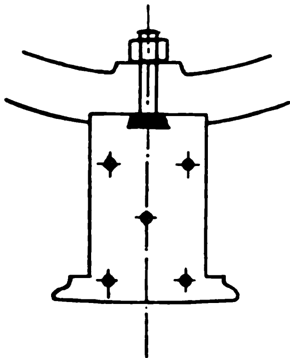
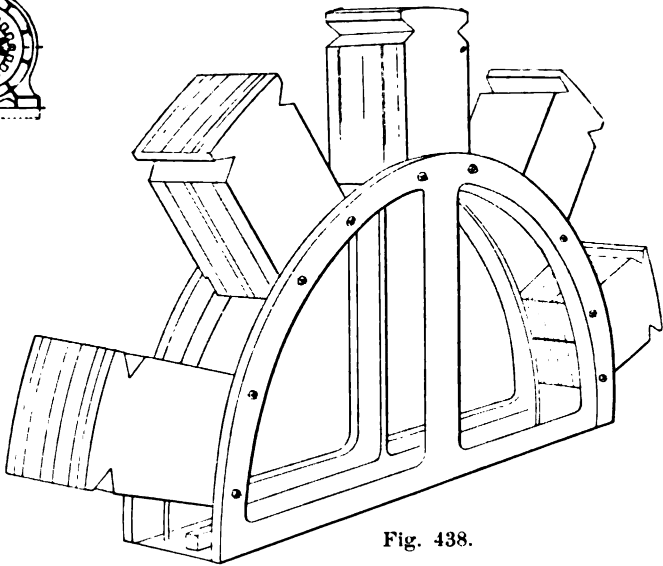


Fig. 437.


Fig. 436.


Fig. 438.

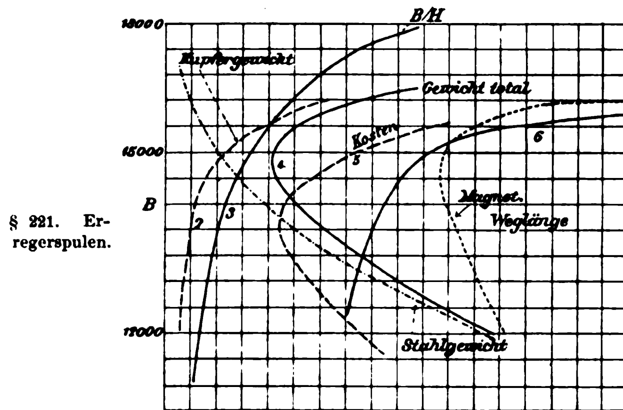


Fig. 439.

Erregung. Wenn nicht andere Faktoren massgebend sind, so ist eine Induktion (unter Berücksichtigung der Streuung) von $B = 14\,000$ bis $15\,000$ die rationellste.

§ 221. Erregerspulen. Die Erregerspulen sollten durchweg auf der Drehbank, nicht von Hand gewickelt werden, zweckmässig ist es, luftabschliessende Spulenkästen zu vermeiden. Bei rotierendem Polkreuz ist jedoch für genügend starke Platten zu sorgen, welche die Centrifugalkraft des Kupfergewichtes aufnehmen. Für starke Erregerströme empfiehlt sich Flachkupfer, das von manchen Firmen hochkant in einer Lage, blank unter Zwischenlegung einer Papierschraube gewickelt wird. Bei grossen Maschinen mit einer einzigen grossen Erregerspule finden sich Vorrichtungen, dass die Spule an Ort und Stelle auf die Maschine gewickelt wird, entweder dadurch, dass ein kleiner Motor die Maschine wickelnd umkreist oder dass die sonst feststehende Spule mit der Achse gekuppelt wird. Bei grossen Maschinen wird übrigens die umfangreiche Einzelerregerspule sehr teuer und schwer reparierbar.

61. Stromabführung.

§ 222. Schleifringe. Die Schleifringe für die Erregerstromzuführung bestehen aus Bronze oder Kupfer; es sind gewöhnlich zwei erforderlich, zu jedem führen der Sicherheit halber zwei Bürsten den Strom. Statt Schleifringen und Bürsten wurde wohl

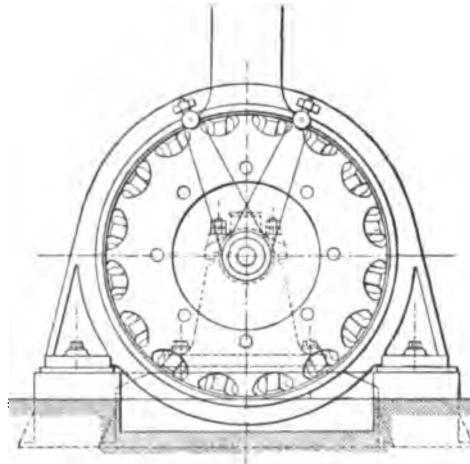


Fig. 440.

auch die Konstruktion Fig. 440 verwendet (Lauffen-Frankfurter Übertragung): Metalldrähte laufen über eine feststehende Rolle und über eine solche auf der Maschinenachse und übertragen den Strom.

Bei rotierender induzierter Wicklung wird der Wechselstrom selbst durch Schleifringe abgenommen. Zur Abnahme von hochgespannten Strömen setzt man wohl einen Schleifring links und den andern rechts vom Anker. Es sind bei Einphasenstrom zwei, bei Drehstrom drei etc. Schleifringe erforderlich, im letzten Falle bei Aussenleitung des neutralen Punktes sogar

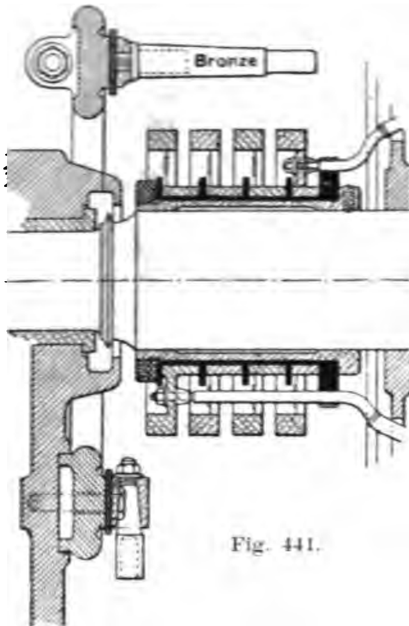


Fig. 441.

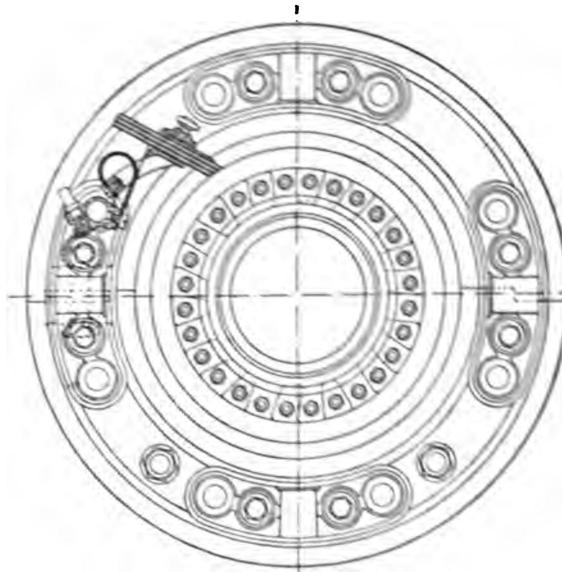


Fig. 442.

deren vier. Eine Schleifringkonstruktion von Alioth für Zweiphasenstrom ist in Fig. 441 u. 442 (Electrician) skizziert, woraus alle Details, auch die Befestigung der Ableitungen ersichtlich ist. Zwei weitere Schleifringausführungen sind in Fig. 443 und 444 gezeichnet. Die einfache Konstruktion Fig. 445 ist

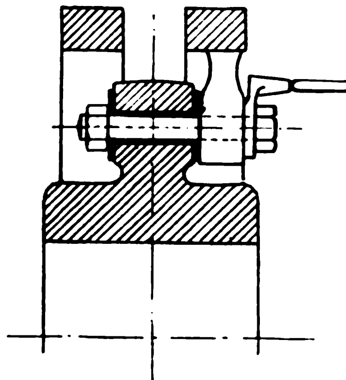


Fig. 443.

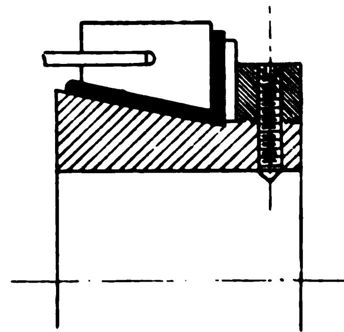


Fig. 444.

Lamme patentiert (U. S. P. 633, 972). — Die Leitung von den Schleifringen zur Erregerwicklung geschieht, wenn ein Lager dazwischen liegt, durch die hohle Achse. Die Schleifringe bestehen in der Regel aus harter Bronze, die nicht rasch verschleissen darf, oder aus Kupfer oder auch aus Gusseisen (Jungfraubahn).

§ 223. Bürsten. Auf Fig. 442 ist auch die Ausbildung der Bürsten gezeichnet und zwar von Metallbürsten, die der bei Gleichstrom üblichen ziemlich entspricht. Die Bürstenbreiten schwanken zwischen 15 und 50 mm, ihre Dicke, sofern es sich um Metall (Kupfer, Bronze) handelt, zwischen 4 und 15 mm. Kohlenbürsten, die nur selten auf Schleifringen vorkommen, sind kaum je breiter als 30 mm, aber bis 30 mm stark. Einen Bürstenhalter, der sowohl für Kohlen- als für Metallklötze geeignet ist, zeigt Fig. 445 *a* (A. E. G.). Der Kohlenhalter Fig. 446 (Union) schmiegt sich dem Schleifring sehr gut an und ist sehr elastisch.

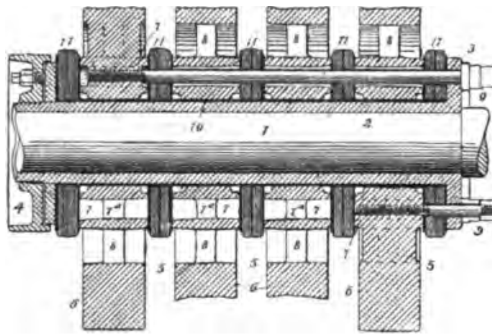


Fig. 445.

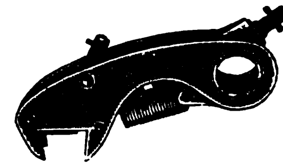


Fig. 445 a.

§ 224. Stromabführung bei Hochspannung. Die Stromabführung hat bei Hochspannung sehr sorgfältig zu geschehen, bis 1000 Volt können Marmorklemmbretter verwendet werden; bei höheren Spannungen empfehlen sich Isolatoren als Klemmen. Alle Leitungen müssen gut gespannt und peinlich isoliert sein, damit Berührungen mit dem Gestell ausgeschlossen sind. Durchführungen sind mit starken, weitüberstehenden Isolationsröhren auszufüttern. Die Stromabführung geschieht immer allgemeiner nach unten in eine Grube.

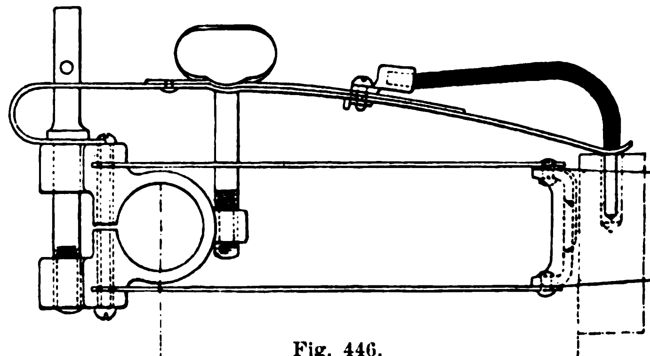


Fig. 446.

62. Mechanisches.

§ 225. Erdung oder Isolierung. Das Gehäuse bezw. Gestell der Maschinen wird am besten geerdet. Vereinzelte Ausführungen liegen allerdings vor, wobei die Hochspannungsmaschinen auf Isolatoren gestellt werden; dann muss aber ein isolierter Bedienungsgang um die Maschine vorgesehen werden. Ganz zuverlässig ist jedoch diese Isolierung nie. Bei Blitzschlägen ist bei Erdung des Gestells ein Ausbrennen viel weniger zu befürchten als bei Isolierung.

Um bei grossen Maschinen Reparaturen allseitig bequem vornehmen zu können, wird das Gestell mit der induzierten Wicklung drehbar angeordnet: Es lässt sich dasselbe z. B. durch einen kräftigen Armstern auf einem Ansatz des Lagerbocks drehen (BROWN) oder man lässt es auf den rotierenden Teil senken und dreht dann (A. E.-G.). Zur Fixierung sind jeweils Stellstifte erforderlich. § 226. Bewegliches Gestell.

Es ist vorteilhaft, wenn man mit dem Feldgestell oder dem Anker auf die Seite fahren kann, entweder in der Achsenrichtung oder bei vertikaler Zweiteilung senkrecht dazu. Die Lager sind reichlich zu bemessen, sodass eine nennenswerte Abnützung auf die Dauer ausgeschlossen ist. Die Lagerböcke sind möglichst standfest und erschütterungsfrei zu entwerfen. Die Zapfengeschwindigkeiten sind mässig zu halten, es ist üblich Zapfenlänge: Durchmesser etwa = 2 bis 5 zu wählen. Bei einer Wellenberechnung sind nicht allein die Torsions- und Biegungsfestigkeit an sich, sondern auch das Arbeitsvermögen und eventuell auch magnetische Züge in Betracht zu ziehen. Das Arbeitsvermögen A ist $c \cdot N \frac{k_1^2 - k_2^2}{E} t$, worin N die Zahl der Spannungswechsel bis zum Bruch, k_1, k_2 die grössten und kleinsten spezifischen Beanspruchungen, denen der Körper unterworfen wird, t die Zeit eines Spannungswechsels, $E = 1\,800\,000$ bei Schmiedeisen, $= 2\,100\,000$ bei Stahl, $c = 2{,}60 \cdot 10^{-7}$ bei Schmiedeisen, $= 1{,}53 \cdot 10^{-7}$ bei Stahl, $A = 7{,}2$ mkg für Schmiedeisen, $= 6{,}3$ mkg für Stahl. Die Lager erhalten fast ausnahmslos Ringschmierung, für eine Länge $\leqq 400$ je einen Ring. Zur Verringerung der Reibung sollen die Ringe nicht zu tief in Öl tauchen. Der Ölbehälter soll genügend gross sein, dass sich Schmutz absetzen kann. Das Gewicht von Dynamomaschinen auf vertikaler Turbinenwelle wird hie und da durch einen Elektromagneten, der gewöhnlich eine grosse Erregerspule besitzt, kompensiert, häufiger durch Öl- oder Wasserdruck. § 227. Lager und Welle.

Auf Schiffen kommt (S. THOMPSON) zu der üblichen Belastung noch eine sogenannte gyrostatische Lagerbelastung der Dynamomaschinen; der hierdurch hervorgerufene Lagerdruck ist:

$$p^{kg} = \frac{G \cdot 2\pi \frac{\alpha}{360} \cdot \frac{2\pi}{t} \cdot \frac{2\pi u}{60} \cdot R}{9{,}81 \cdot l} \quad \ldots\ldots \quad (102)$$

G ist das Ankergewicht, α der Schiffsschwingungswinkel, t die Zeit einer Schwingung, l die Lagerentfernung, R der Radius der Kreisbewegung, z. B. $= \frac{l}{2}$, u die Umlaufszahl.

Der Durchmesser d^{cm} der Welle wird öfters nach der Beziehung

$$\left.\begin{aligned} d &= 23 \sqrt[3]{\frac{A}{u}} \text{ (Schmiedeisen)}, \\ d &= 21 \sqrt[3]{\frac{A}{u}} \text{ (Stahl)} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (103)$$

gewählt. A in KW, u Touren pro Minute.

Der magnetische Zug in kg lässt sich nach FISCHER-HINNEN berechnen aus

$$\frac{B^2 q}{25 \cdot 10^6} \frac{x}{\delta \alpha} A \quad \ldots\ldots \quad (104)$$

Es ist B die Luftinduktion, q der Polquerschnitt, x Wellenverschiebung aus dem Mittel, δ Luftspalt, $\alpha = \frac{\text{Gesamter magnet. Widerstand}}{\text{Luftwiderstand}}$, A ist bei vierpoligen Maschinen ca. 2 und steigt bei zehnpoligen bis auf 20. Bei grossen Dampfdynamos lässt sich eine grosse Variation des magnetischen Zuges durch Vibrationen beobachten.

Wegen der Lagererwärmung soll die Lagerlänge l sein

$$l \geqq \frac{P \cdot f \cdot u}{1900 \cdot F} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (105)$$

wenn P^{kg} der Lagerdruck, $f = 0{,}04 - 0{,}08$, u die Umdrehungszahl, $F = 1\ \mathrm{kgm}/c^2$ ist. Die Lagerschalen müssen bequem auswechselbar sein und sollen an einer niedrigeren Stelle geteilt sein wie die Lagerdeckel, damit das Öl nicht nach aussen läuft. Es ist zweckmässig die Lagerschale kugelig zu lagern.

Kugel- und Walzenlager finden für kleinere Maschinen immer mehr Verwendung. Es ist zu verlangen, dass dieselben geräuschlos laufen und dass die Kugeln nicht zerbrechen. Sie sind in der Regel sehr teuer.

Bei der Formgebung der Grundplatte sind scharfe Ecken zu vermeiden; die Übergänge sollten durch ausgeprägte Bögen, z. B. Parabelbögen geschehen.

§ 228. Arme und Gestell. Die Arme des rotierenden Rades sind entweder oval oder I- bezw. [-förmig, bei grösseren Typen werden Doppelspeichenräder erforderlich. Man berechnet die Arme zweckmässig so auf Biegung, dass einmal angenommen wird, der Kranz werde nicht deformiert, dann unter der Annahme, der Kranz sei so schwach, dass er überhaupt nicht auf die Arme rückwirkt, siehe „Bach, Maschinenelemente", sowie dessen „Elastizität und Festigkeit", zwei Werke, die auch im Dynamobau an erster Stelle zu Rate gezogen werden sollten.

Die geteilten Gestelle werden in der Regel verschraubt. Ungeteilte Räder schrumpft man mit Schrumpfringen auf der Nabe auf, geteilte Räder werden nicht selten statt durch Schrauben am Anfang und Ende der geteilten Arme durch ovale Schrumpfringe zusammengehalten (z. B. Schuckert & Co.). — Für kleine Maschinen wird der Keil hin und wieder durch eine einfache Abflachung der Welle ersetzt.

§ 229. Ausbalancieren. Schwungmasse. Brummen. Der rotierende Teil raschlaufender Maschinen ist sorgfältig auszubalancieren und zwar statisch und dynamisch. Die statische Störung des Gleichgewichtes wird auf zwei ebenen, parallelen Schienen oder zwischen reibungslosen Rädern gefunden. Es sind an geeigneten Stellen Ausgleichsgewichte anzubringen. Um einen Anker dynamisch auszubalancieren, steckt man ihn auf eine Drehbank, wobei sich während der Drehung eine Störung durch einen Kreidestrich erkennen lässt.

Bei direkt gekuppelten Maschinen hat der rotierende Teil zugleich mehr oder weniger als Schwungrad zu dienen, er ist deshalb nach Möglichkeit massig zu konstruieren, nur wo es in magnetischer Hinsicht erforderlich ist, sollte Stahlguss, sonst durchweg Gusseisen verwendet werden. Der Durchmesser ist innerhalb der durch die Umfangsgeschwindigkeit gegebenen Grenzen möglichst gross zu halten, was zu schmalen Maschinen führt, die verhältnismässig geringe Grundfläche einnehmen und sich der Dampfmaschine gut anschmiegen. Die Schwungmasse wird gewöhnlich in dem Wert $\frac{m v^2}{2}$

angegeben; übliche Ausführungen ergeben z. B. bei 500 KW 125 Touren $\frac{m v^2}{2}$ $= 300000$ mkg; v ist dabei die Geschwindigkeit am Ende des Trägheitshalbmessers.

Die alten Wechselstrommaschinen zeigten nicht selten ein brummendes Geräusch, besonders Pol- oder Zackenanker sind dazu geneigt, auch Maschinen mit grossen und wenigen, offenen Nuten. Durch Abschrägen der Polschuhe oder teilweises Schliessen der Nuten oder Verwendung vieler Nuten und grossen Luftzwischenraums lässt sich das Brummen, solider Aufbau vorausgesetzt, gewöhnlich vermeiden. Lange Magnetpole, die rotieren, wirken unter Umständen wie Stimmgabeln.

Bei Einphasenmaschinen kann es vorkommen, dass massive Pole sich bei induktionsfreier Last nicht erwärmen, dagegen bei induktiver sehr stark, was seinen Grund in der variierenden Ankerrückwirkung hat.

J. Beschreibung moderner Typen.

63. Wechselstrommaschinen deutscher Firmen.

§ 230. Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft.

Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft Berlin baut für Niederspannung bis ca. 500 Volt Drehstrommaschinen mit rotierendem Anker (Fig. 447)[1] und vier Schleifringen, einer für den Verkettungspunkt. Eine zwei-

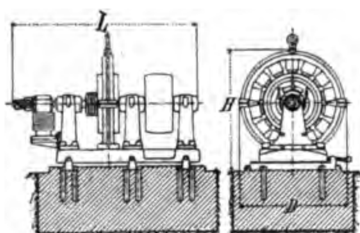


Fig. 447.

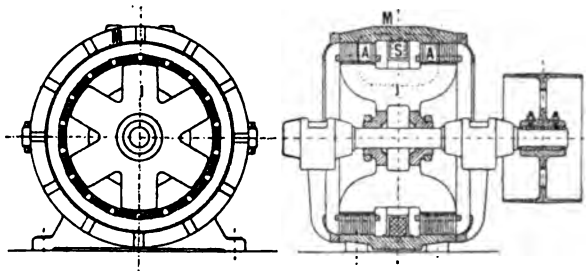


Fig. 448.

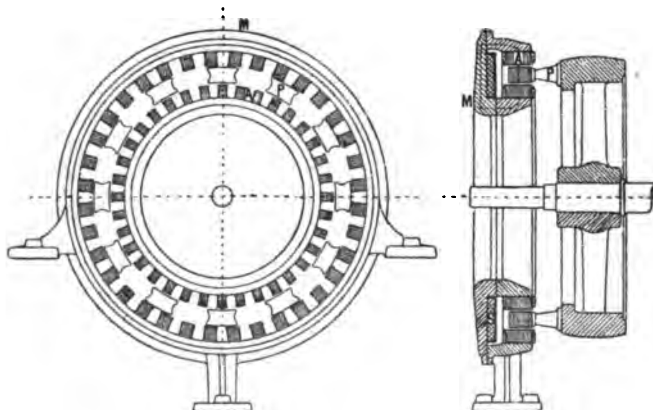


Fig. 449.

polige Erregermaschine sitzt direkt auf der verlängerten Achse. Das Feldgestell gleicht demjenigen einer Aussenpol-Gleichstrommaschine, die Polzahl ist allerdings gewöhnlich bei Drehstrom höher.

1) Nach dem „Hilfsbuch für Elektrotechnik“ von GRAWINKEL & STRECKER.

Für Hochspannung und grosse Leistung führte bis vor kurzem die A. E. G. Maschinen der Gleichpoltype (Fig. 448 u. 449) aus. Die Type Fig. 448 ist für Riemen- oder Seilantrieb, die Type Fig. 449 für direkte Kupplung bestimmt. Die Maschine Fig. 448 hat zwei Anker *A* nebeneinander, zwischen denen die Erregerspule *S* liegt. Das rotierende Induktorrad ist in Fig. 450 besonders gezeichnet. Die Polhörner aus



Fig. 450.

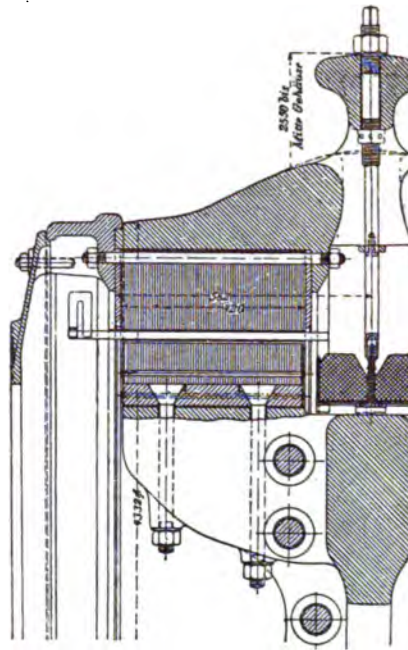


Fig. 451.

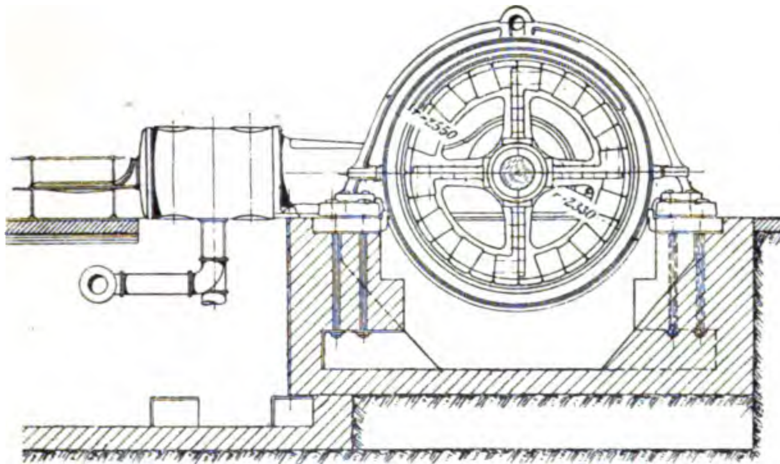


Fig. 452.

lamelliertem Material sind in ersichtlicher Weise aufgeschraubt. In Fig. 449 sind die Polhörner *P* direkt an das Schwungrad geschraubt und rotieren zwischen zwei Ankerwicklungen *A*, die also radial übereinander liegen. Die Erregerspule *S* liegt dahinter. Ein genauer Durchschnitt der ersten Type ist in Fig. 451 gegeben. Die Maschine hat Stabwicklung; die Erregerspule ist durch lange Zugbolzen am Gehäuse centrisch befestigt.

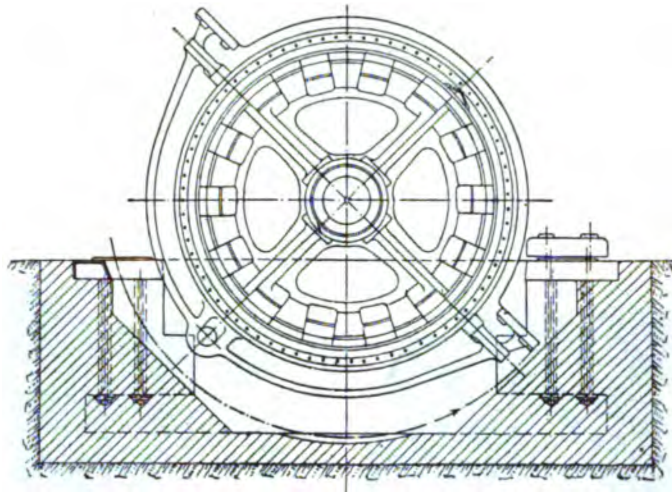


Fig. 453.

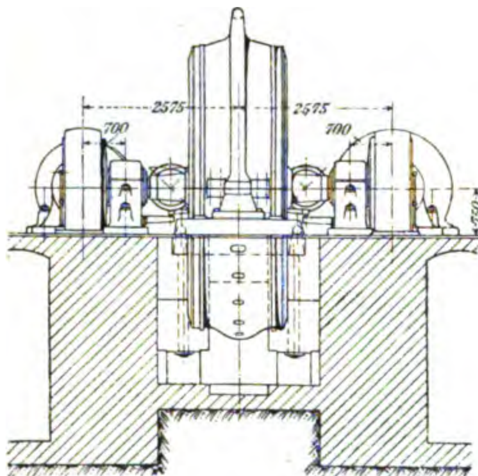


Fig. 454.

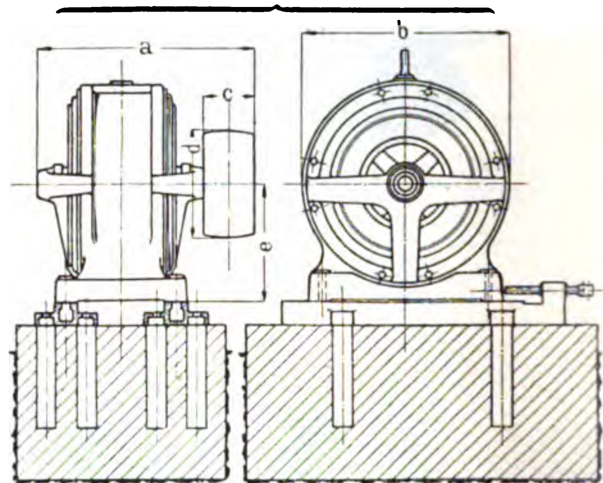


Fig. 456.

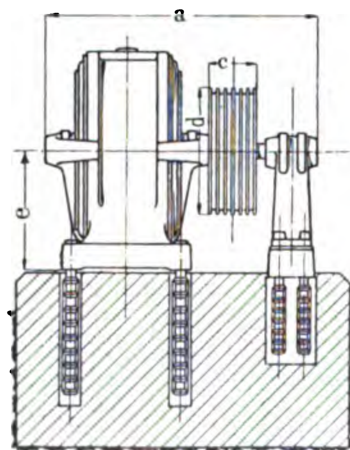


Fig. 457.

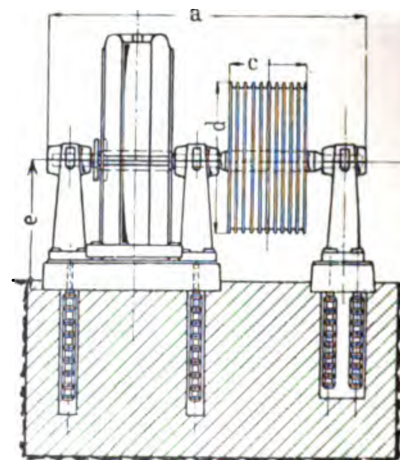


Fig. 458.

Zur Reparatur von Ankerspulen kann der äussere Teil auf den rotierenden Polstern herabgelassen und auf demselben gedreht werden, indem die seitlichen Platten, auf denen die Maschine ruht, einerseits weggezogen werden (Fig. 452—454). Die Drehbewegung geschieht durch die Antriebsmaschine. Das Polrad mit angesetzten Blechpacketen besteht aus vier Stücken in Stahl.

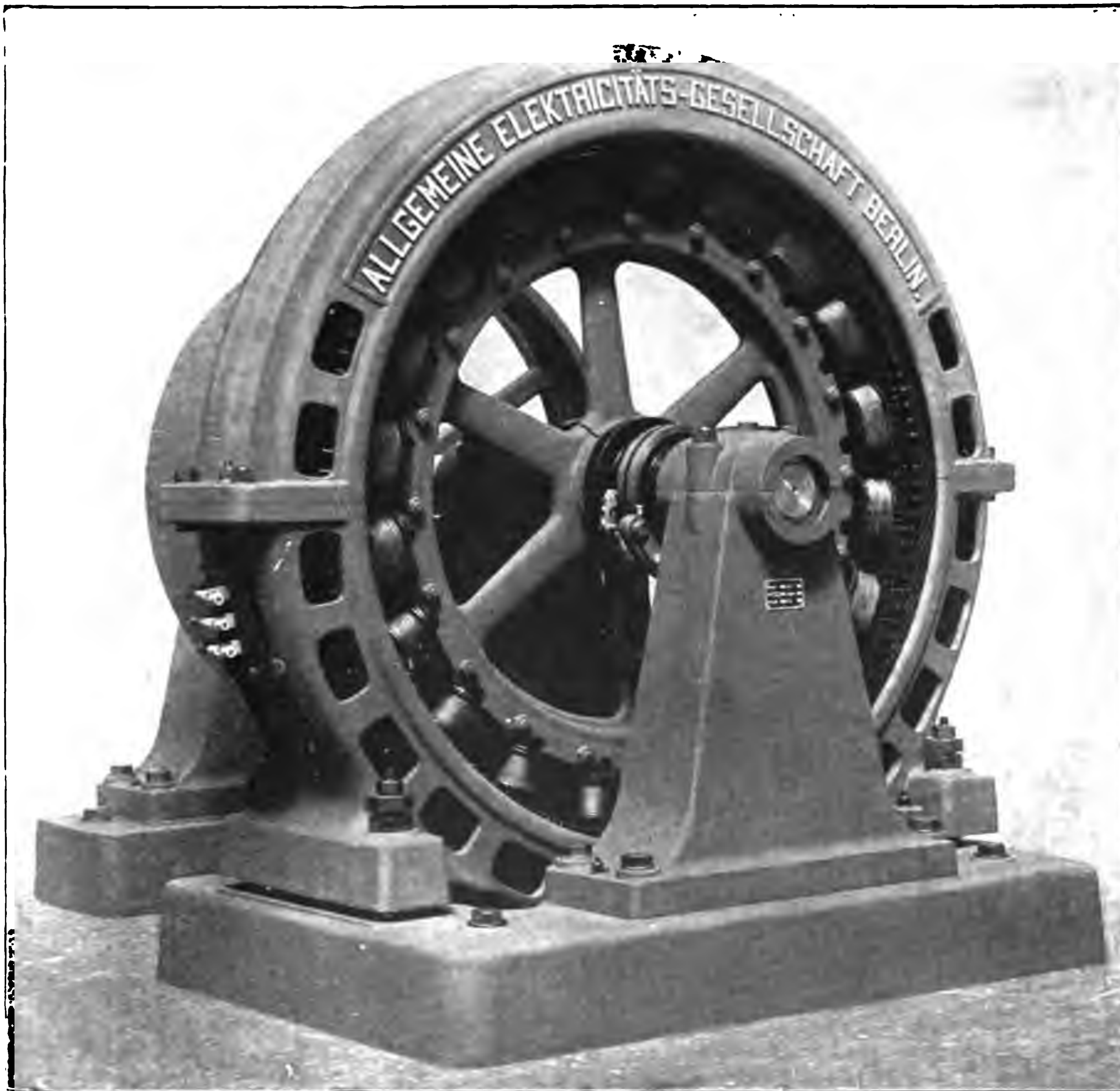


Fig. 455.

Neuerdings baut die A. E.-G. für beliebige Leistungen und Spannungen, für Riemenantrieb und direkte Kupplung, Maschinen nach der Innenpoltype (Fig. 455—458). Die Konstruktion der Pole ist früher (Fig. 429) gegeben. Die kleineren Modelle (Fig. 456 u. 457) haben keine Stehlager. Die Lager sind durch drei Arme am Gestell abgestützt.

§ 281. Helios. Eine Wechselstrommaschine für 1000 *PS*, 85 Touren, der Helios E. A.-G. Köln, ist in Fig. 459 u. 460 entworfen und in Fig. 461 u. 462 noch weiter detailliert. Die Pole bestehen aus gestanzten Blechen in **U**-Form. Die Erreger-

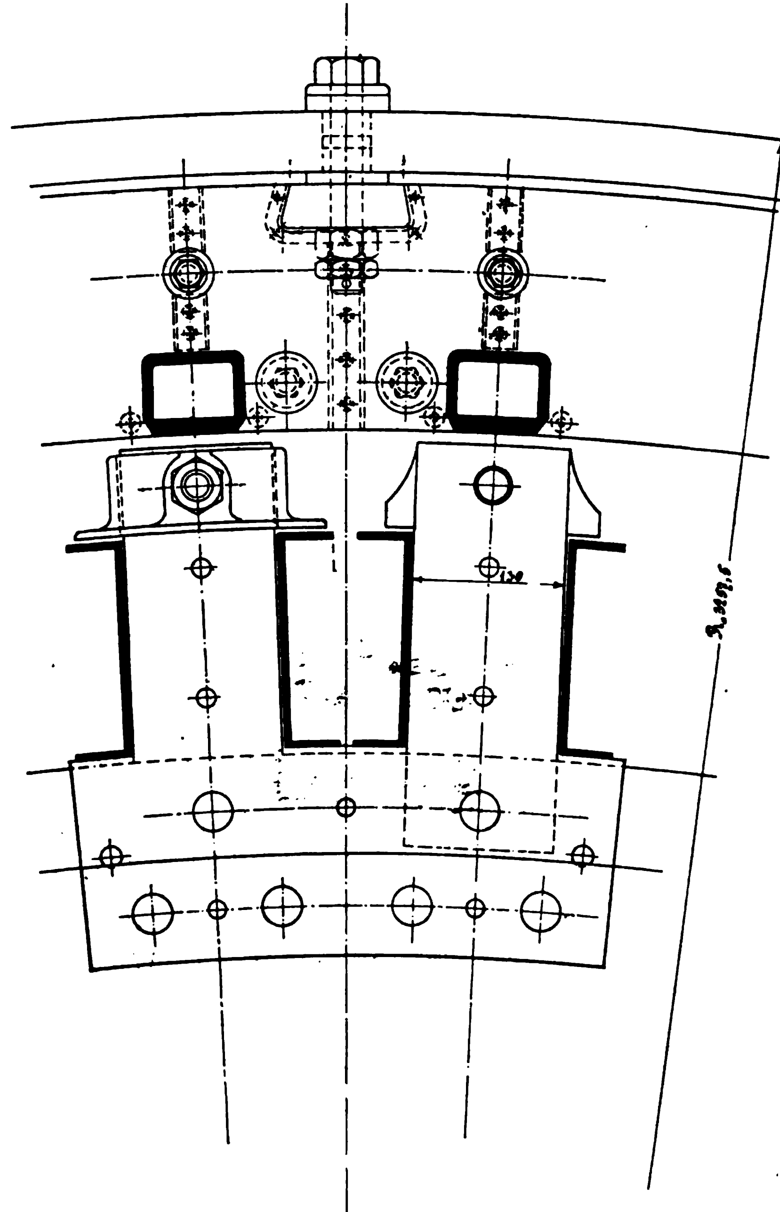
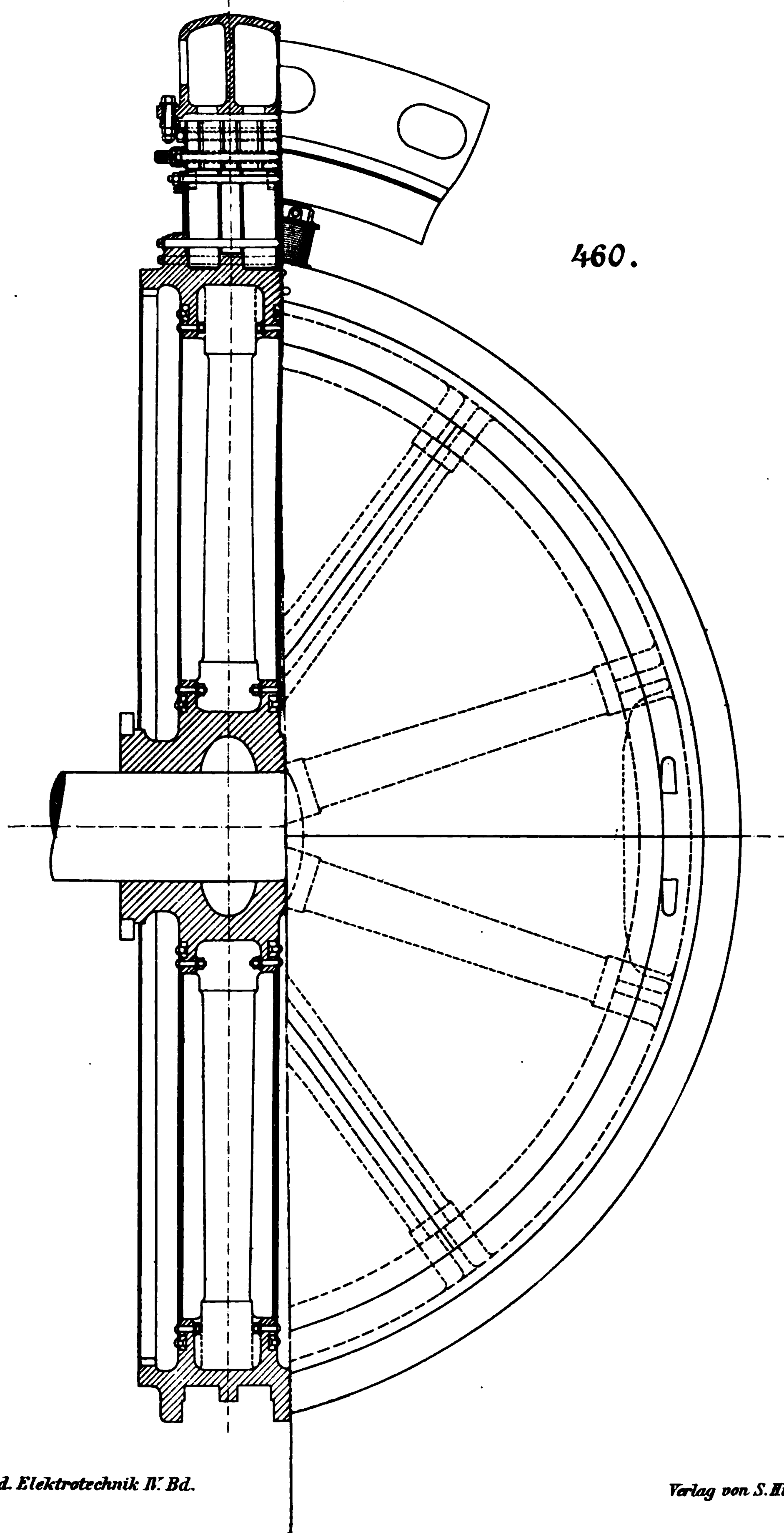
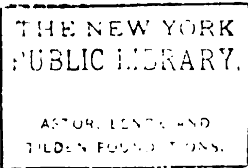


Fig. 461.

spulen werden auf der Drehbank gewickelt; sie sind durch Randstücke gegen Centrifugalkraft geschützt. Die Ankerbleche sind durch zwei Bolzenreihen zusammengehalten. Die Ankerwicklung wird in den offenen, nahezu rechteckigen Nuten durch Holzkeile festgehalten. Die **U**-förmigen Nutenhülsen sind circa 8 mm stark. Das aktive Ankereisen ist isoliert mit einem riesigen



Verlag von S. Hirzel-Leipzig.



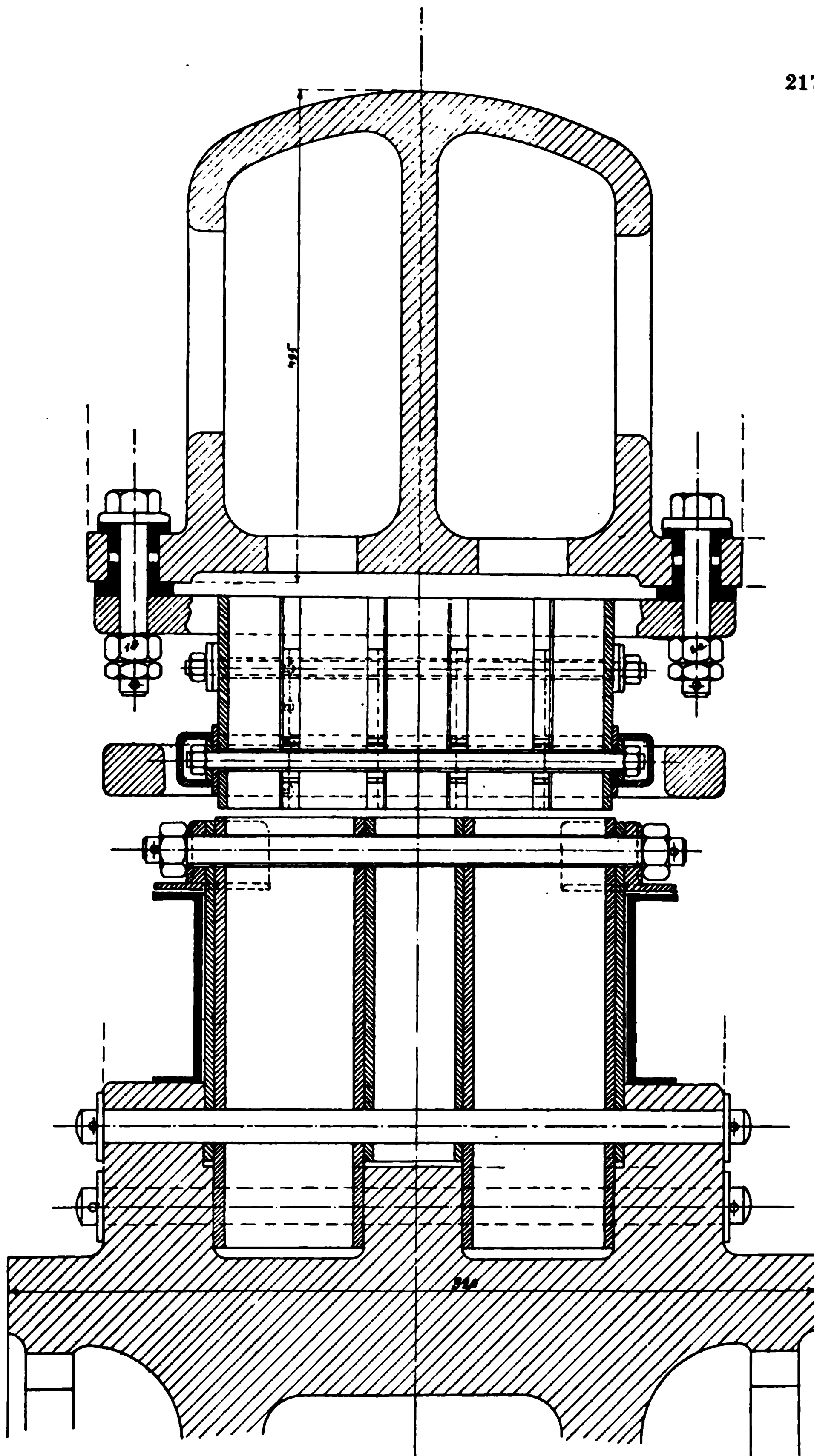


Fig. 462.

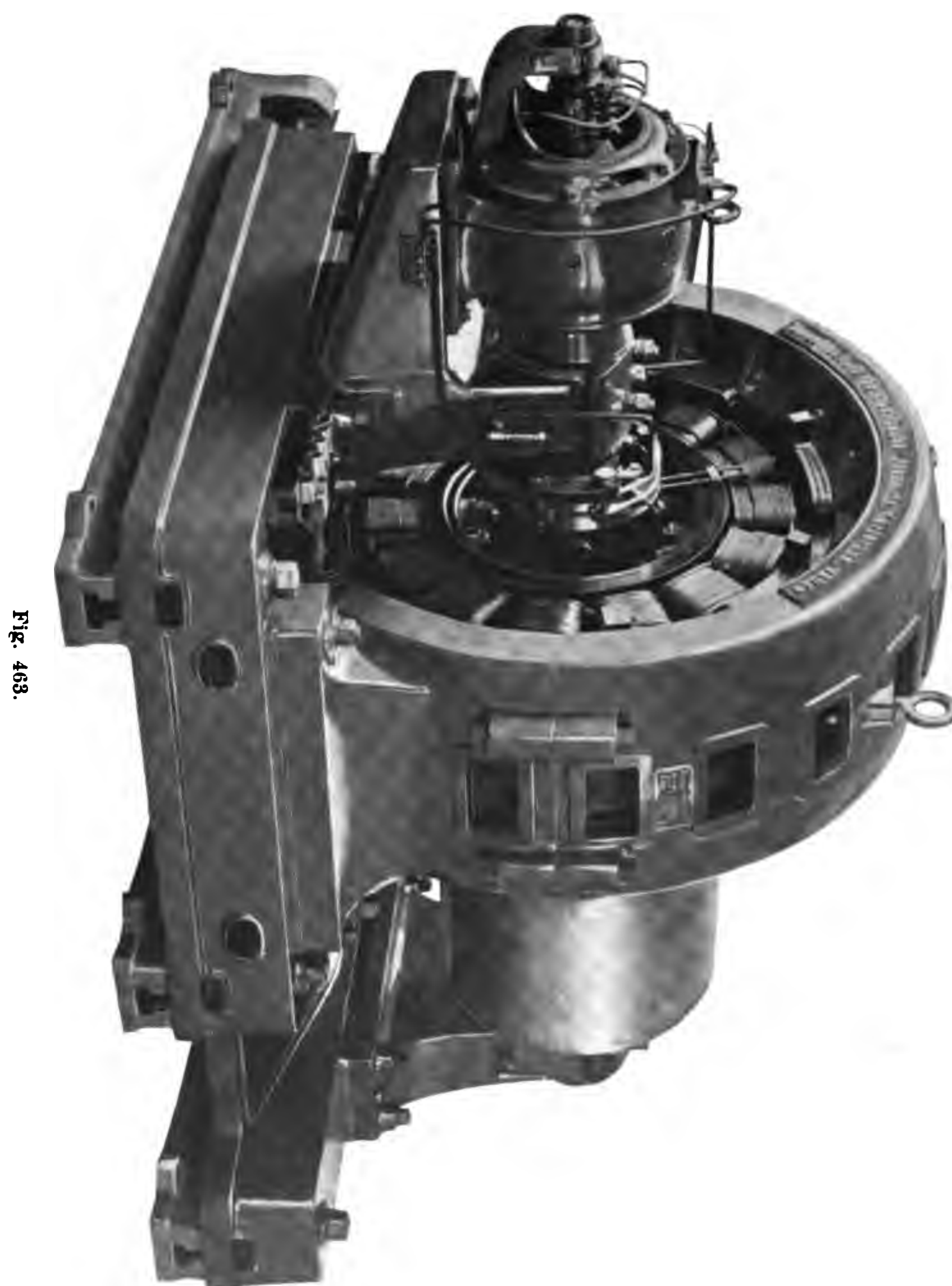


Fig. 463.

Kastenträger verschraubt. Eine grössere Reihe dieser Maschinen laufen in der Centrale Petersburg. Das Gestell kann mit Spindeln auf die Seite gefahren werden. Die Erregermaschine ist direkt gekuppelt.

Der Wechselstromgenerator Fig. 463 der Gesellschaft für elektrische Industrie Karlsruhe der Innenpoltype leistet bei 425 Touren, 65 Volt, 1700 Ampère. Die Wicklung besteht aus Vierkantkupfer. Die § 282. Gesellschaft für elektrische Industrie.

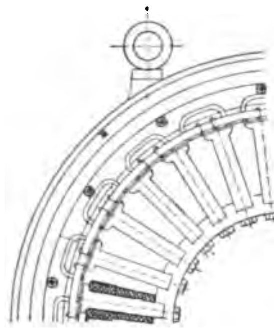


Fig. 464.

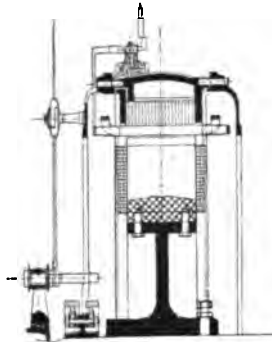


Fig. 465.

Maschine Fig. 464 u. 465 ist für das elekrotechnische Institut der Hochschule Karlsruhe gebaut und dem Bericht über dieses Institut von Professor Arnold entnommen.

Einen Durchschnitt einer älteren Wechselstrommaschine von der Aktien-Gesellschaft für Elektrizität, vorm. Kummer & Co., zeigt Fig. 466. § 283. Kummer & Co.

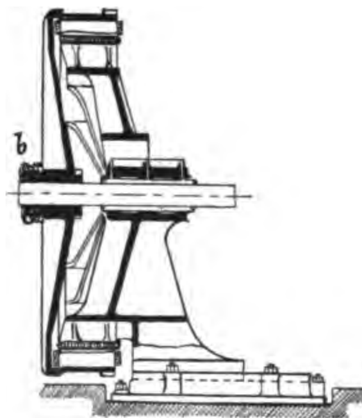


Fig. 466.

Dieselbe hat feststehende Ringanker und rotierende Aussenpole; sie ist für direkte Kupplung bestimmt. *b* sind die Schleifringe. Die Welle ist im Ankergestell gelagert. — Die neueren Maschinen dieser Firma entsprechen der Skizze Fig. 467 u. 468: Innenpoltype, direkt gekuppelter Erreger, das Gestell ist durch zwei starke Speichenkränze, welche die Ankerbleche zwischen sich fassen, auf die Lagerböcke abgestützt und aufgeschraubt. Das Gestell kann für Reparaturen leicht gedreht werden. Die Magnetkerne

sind aufgeschraubt und durch kreuzweise geführte Schlitze unterteilt. Der aussenliegende Anker besteht aus einer Reihe Segmente, die bequem aus-

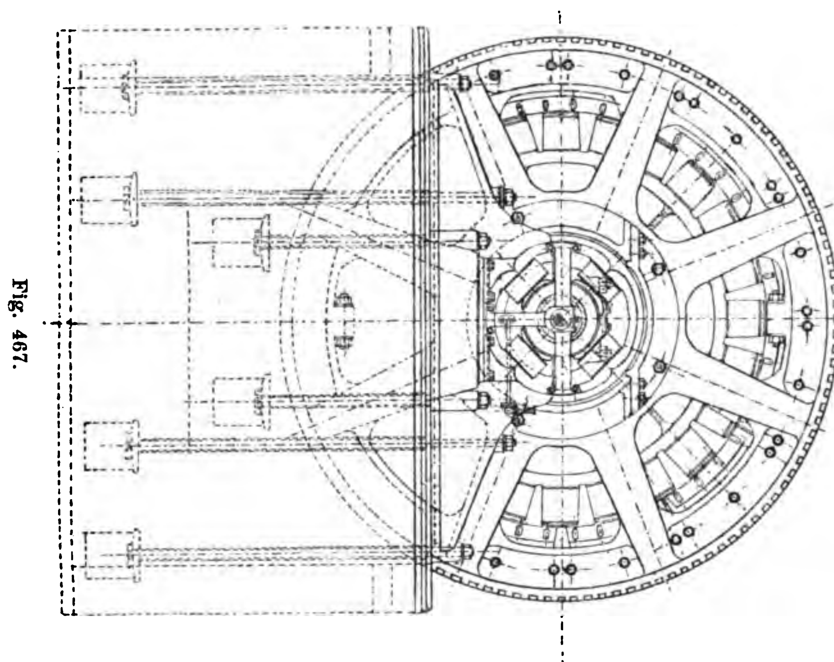


Fig. 467.

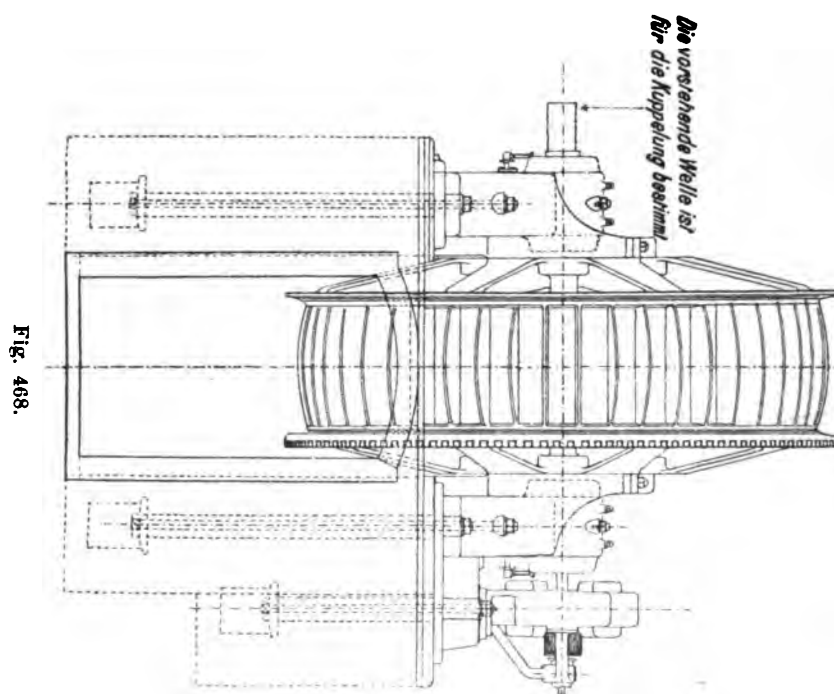


Fig. 468.

gewechselt werden können. Der Strom wird vom untersten Segment abgenommen, an dem vorn und hinten keilförmig verlaufende Kupferstücke

befestigt sind, welche sich zwischen festgelagerte Stromzuführungsfedern einpressen; die Anordnung ermöglicht eine Drehung des Gestelles ohne jegliche Vorsichtsmassregel.



Fig. 469.

Der durch Fig. 469 u. 470 gekennzeichnete Wechselstromgenerator der Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft, vorm. Hermann Pöge, Chem- § 234. H. Pöge.



Fig. 470.

nitz, für 175 KW bei 2500 Volt Spannung und 185 Umdrehungen pro Minute besitzt ein Magnetrad (Fig. 469) direkt auf die Welle der Dampfmaschine aufgekeilt, dessen Kranz besonders schwer gehalten ist, um einen geringen Ungleichförmigkeitsgrad der Dampfmaschine zu erreichen.

Die Pole bestehen aus Stahlguss und sind in den Gusseisenkranz eingesetzt und ausserdem noch mit seitlich angelegten Stahlwangen verschraubt. Die Polköpfe sind bis zur Tiefe von 6 cm aus Eisenblechlamellen hergestellt, welche durch je zwei Querbolzen in dem Stahlkern gehalten werden.

Der Ankerkörper ist durch zwei seitliche Spannringe zusammengepresst, an denen direkt angeschraubt auf beiden Seiten zwei gusseiserne Wangen angeordnet sind, die ihrerseits drehbar auf den beiden, auf dem Fundamentrahmen stehenden Ständern sitzen. Hierdurch wird es ermöglicht, das gesamte Ankergestell behufs Zugänglichmachung der in der Grube liegenden Teile auf diesen Ständern zu drehen, während ausserdem die Wangen selbst einen natürlichen Schutz sowohl der Wicklung als des sich drehenden Magnetrades bilden.

Diese Konstruktion birgt gegenüber einer festen Anordnung des Ankerfeldes, bei welcher behufs Zugänglichmachung der unteren Teile des Feldes eine besonders breite Grube mit Einsteigetreppe notwendig ist, so grosse Vorteile in sich, dass die allerdings teurere Konstruktion gerechtfertigt erscheint.

Die Hochspannungswicklung ist in Mikanitröhren von 3,5 mm Wandstärke eingebettet und derart in Löcher des Ankereisens eingelassen, dass pro Spulenseite zwei Löcher Verwendung finden, deren Abstand gleich $^1/_6$ der Teilung ist. Diese Anordnung giebt einen annähernd sinusförmigen Verlauf der Spannungskurve.

Die wichtigsten Daten der Maschine sind:

Ausgeführter Durchmesser des Ankers	2520 mm
Anzahl der Löcher	64
Wirksame Windungen im Anker	480
Querschnitt des Ankerdrahtes	30 qmm
Durchmesser des Magnetrades	2502 mm
Anzahl der Pole	32
Effektiver Querschnitt eines Poles	280 qcm
Länge eines Poles	180 mm
Anzahl der Windungen pro Pol	100
Querschnitt des Drahtes	4,75 × 8,75
Widerstand sämtlicher 32 Spulen, warm . . .	1,2 Ohm.

Zur Erregung der Maschine sind nötig 50 Ampères bei 60 Volt oder rund 1,7 Proc.

Fig. 471 stellt einen Drehstromgenerator dar für eine Leistung von 75 KW bei 120 Volt verketteter Spannung, 500 Umdrehungen pro Minute und 50 Perioden pro Sekunde.

Die Maschine besitzt eine centrale Erregerspule, über welche die in der Abbildung ersichtlichen Polhörner abwechselnd hinweggreifen (Wechselpole). Die Konstruktion, welche bei kleineren Typen vorteilhaft Anwendung findet, bedingt insbesondere eine wesentlich geringere Erregerstromstärke bei geringerem Kupfergewicht, als dies bei den einzelnen bewickelten Polen der früher beschriebenen Maschine der Fall ist. Dagegen fällt das Gewicht des Induktors ganz wesentlich schwerer aus.

Die Polhörner sind bei dieser Maschine nicht unterteilt, weil die Löcher im gegenüberliegenden Ankereisen nicht offen sind und ausserdem in gleichmässigen Abständen von einander angeordnet sind, so dass ein stark fluktuierendes Feld, welches übrigens infolge eines verhältnismässig grossen Luftabstandes zwischen Ankerfeld und Magnetrad noch ausgeglichen wird, nicht vorhanden ist. Thatsächlich erwärmen sich auch die Pole dieser Maschine im Betrieb nicht im geringsten.

In das Ankereisen sind durch Mikanitröhren isolierte, starke Kupferstäbe eingeschlossen. Die Verbindung dieser Stäbe unter sich geschieht, wie aus der Abbildung ersichtlich, durch Façonstücke, welche aus Kupfer gegossen sind.

Fig. 471.

Die wichtigsten Daten dieser Maschine sind:

Ausgebohrter Durchmesser des Ankers . . .	808 mm
Breite des Ankerfeldes	350 „
Gesamtzahl der Löcher im Anker	72
Dimensionen der Löcher	10 × 25
Durchmesser des Magnetrades, aussen	800
Anzahl der Pole	12

Freier Wickelraum der zwischen den Polen liegenden centralen Erregerspule:

Breite	105 mm
Höhe	80 „
Gesamtwindungen der Erregerspule	1400
Drahtstärke	2,1 isoliert 2,5
Widerstand der Erregerspule, warm	15 Ohm
Notwendige Erregerstromstärke bei 110 Volt vorhandener Erregerspannung	ca. 7 Ampère

mithin notwendige Watt für die Erregung ca. 1 Proc. der Leistung.

Die wichtigsten Daten für eine Gleichpoltype von 125 KW, 250 Touren mit zwei Ankern sind die folgenden (Fig. 472 u. 473):

Bearbeiteter Durchmesser der beiden Ankerfelder	1280 mm
Breite eines Ankers	175 „
Anzahl der Löcher pro Anker	72

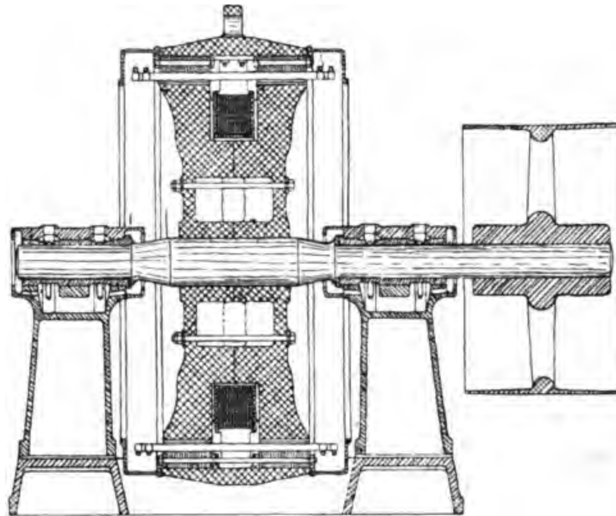


Fig. 472.

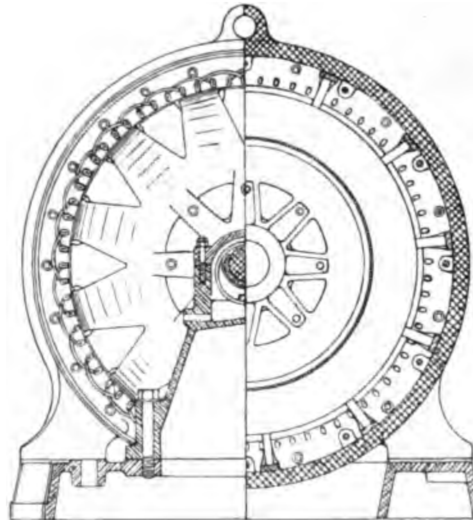


Fig. 473.

Dimensionen der Löcher	15 × 22
Querschnitt der eingeschobenen Kupferstäbe .	250 qmm
Durchmesser des Magnetrades, aussen . . .	1270 mm
Anzahl der Windungen der centralen Erregerspule	1100
Widerstand derselben	7 Ohm

Erregerstromstärke bei 65 Volt Erregerspannung ca. 9 Ampères gleich ca. 0,5 Proc. der Leistung.

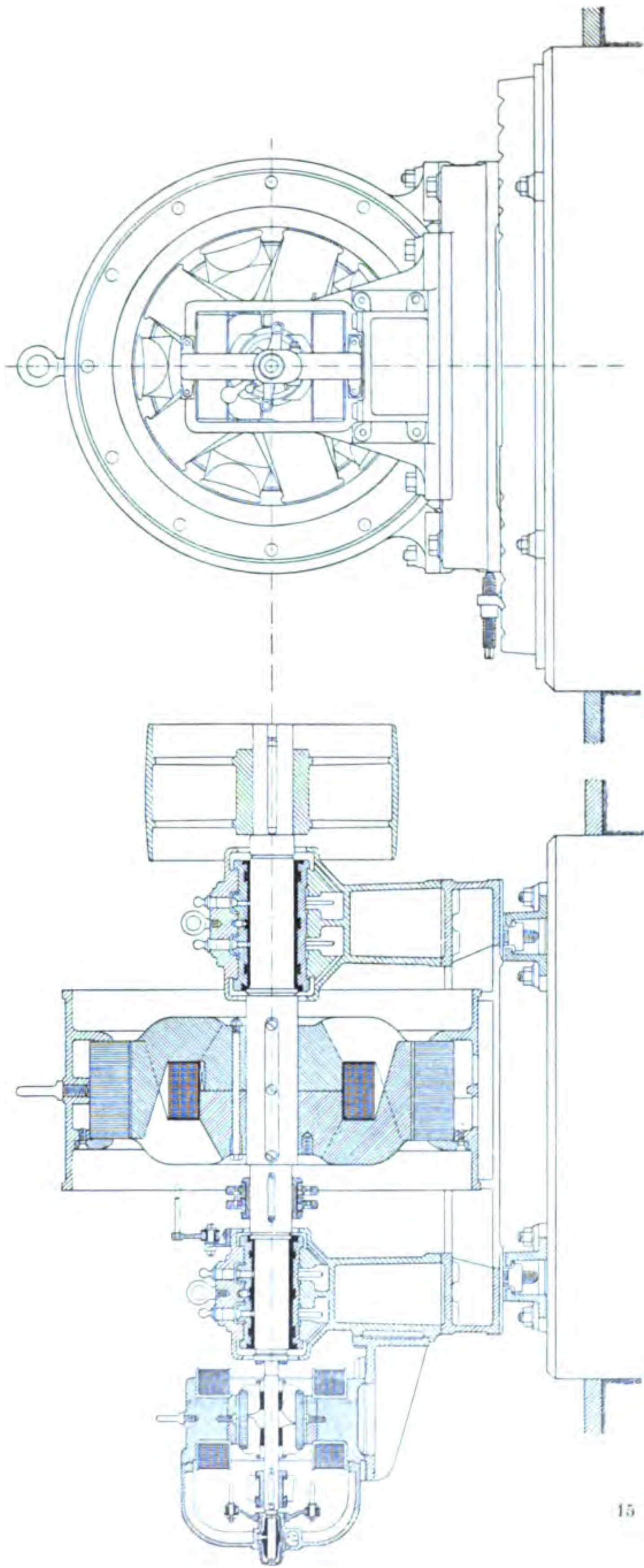


Fig. 474.

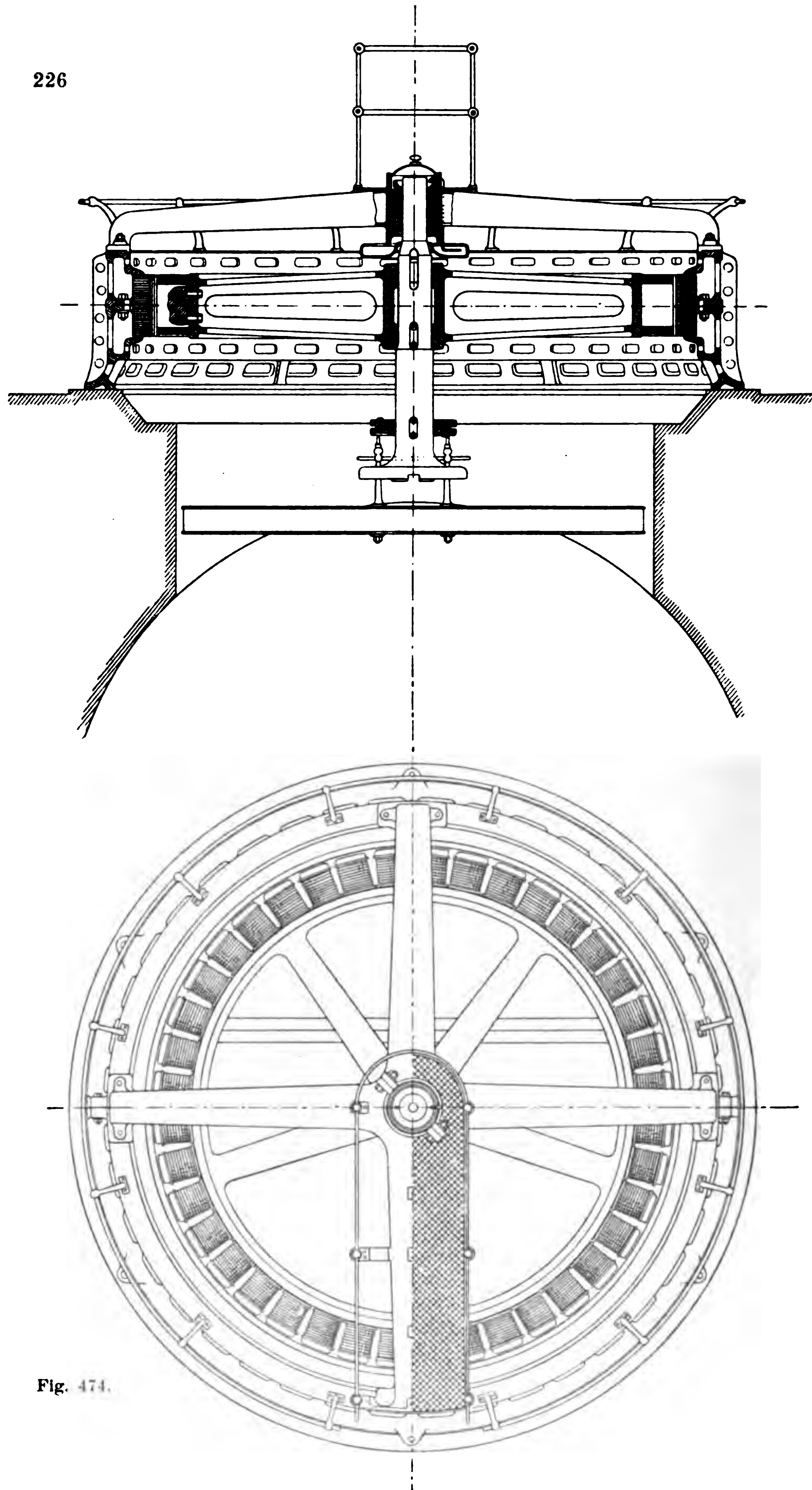


Fig. 474.

Für niedrige Leistungen verwendet die Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft, vorm. Schuckert & Co., Innenpolmaschinen (Wechselpoltype) mit gemeinsamer Erregerspule z. B. Fig. 474 für 65 KW 600 Touren. Auf einer Konsole des Lagerbockes sitzt die zweipolige Erregermaschine. Die Maschine Fig. 475 für 850 KW 150 Touren hat durchweg bewickelte rotierende § 235. Schuckert & Co.

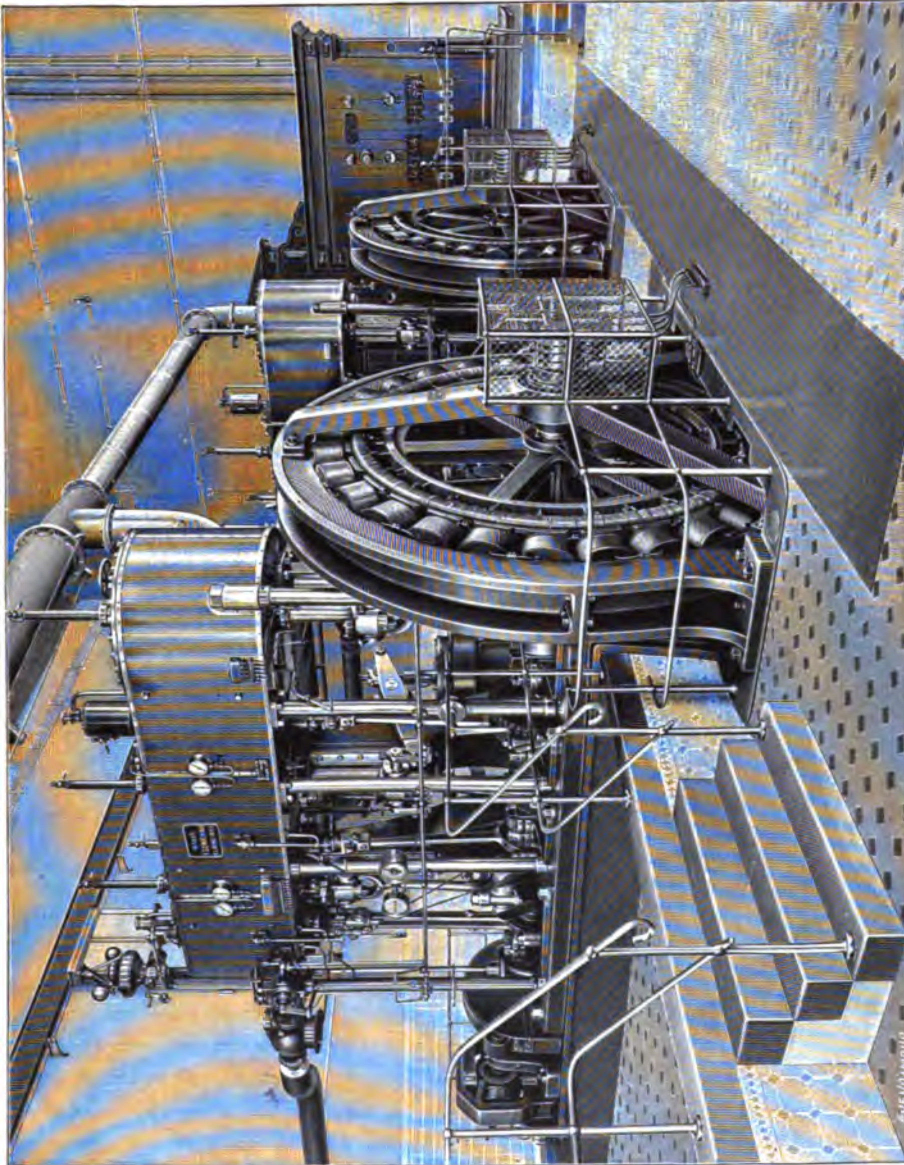


Fig. 476.

Innenpole, die auf ein Speichenrad mit vertikaler Welle geschraubt sind. Die Ankerbleche sind durch zwei kastenförmige Gussringe zusammengepresst, wobei lange durchgehende Bolzen überflüssig werden. Für niedrige Spannung und geringere Leistungen liefert die Firma ihre Gleichstromtype mit Aussenpolen und rotierendem Anker. Zu dieser Klasse gehört auch die Maschine Fig. 476 mit Ringanker. Das Aussenlager ist durch einen dreiteiligen Arm-

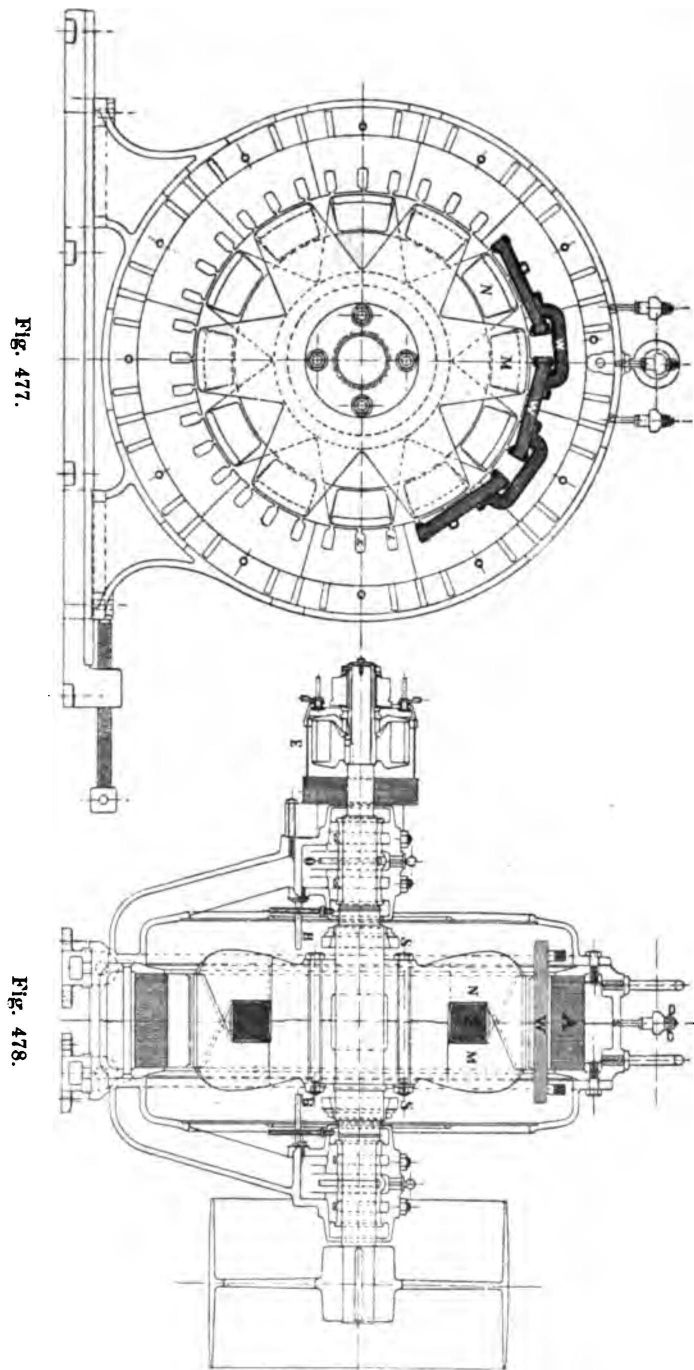


Fig. 477.

Fig. 478.

stern vom Magnetgestell aus gestützt. Die Schleifringe, die den Zweiphasenstrom abnehmen, sitzen ausserhalb dieses Lagers, so dass die Leitungen die hohle Welle durchsetzen müssen.

§ 236. L. Schwartzkopff. Für Leistungen bis 100 *PS* führt die Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft, vorm. L. Schwartzkopff, die Type Fig. 477 u. 478 aus. Das Polrad besteht aus zwei stählernen Hälften, die durch die Bolzen *S* zusammengehalten werden. Für grössere Leistungen verwendet dieselbe Firma die Induktortype Fig. 479 (ältere Ausführung) bezw. Fig. 480 u. 481. Bei letzterer sind die Polhörner der beiden Kränze um eine $^1/_2$ Teilung versetzt, so dass die Anker durchgewickelt werden können. Die Ankerspulen sind nach Schablone gewickelt und leicht ersetzbar. Das Ankergehäuse kann gedreht werden. Die Polhörner sind massiv. Die Erregerspule ist auf eine T-Form gewickelt und am Gestell aufgehängt. Die Maschine Fig. 480 leistet bei 250 Touren 150 KW $\times$ cos φ einphasig.

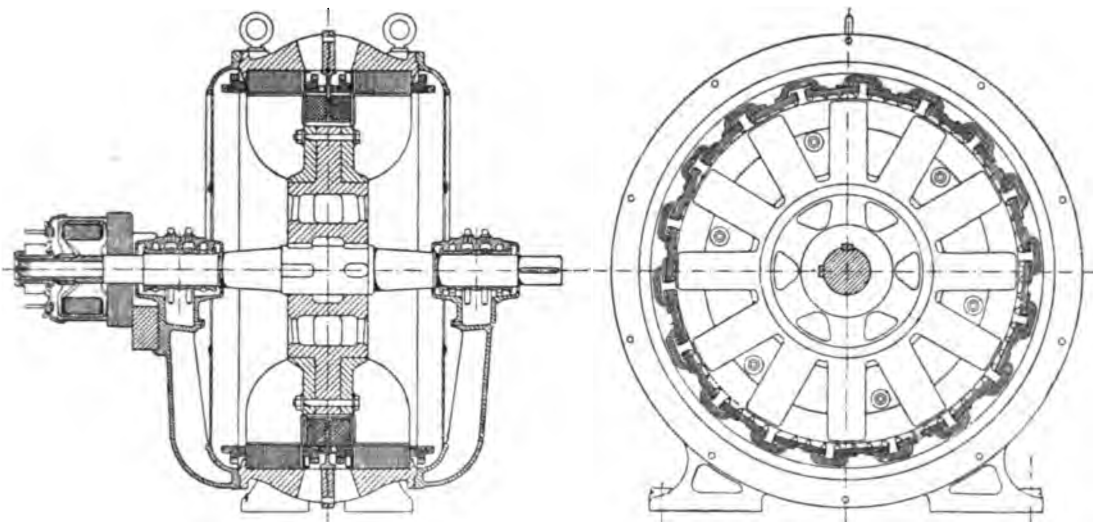


Fig. 479.

§ 237. Siemens & Halske. Wie schon aus dem Abschnitt „Historisches“ zu ersehen ist, war Siemens & Halske eine der ersten Firmen, die Innenpolmaschinen baute und bis heute an dieser Type berechtigterweise festgehalten hat. Ein älteres Bild dieser Maschinentype ist in Fig. 482 gegeben. Die Pole werden je zu zweien aus dünnen Blechen aufgebaut und verschraubt. Die Erregerwicklung wird von Hand aufgebracht. Die Hauptwicklung liegt in halboffenen Nuten. Die Klemmen sind in isolierende Büchsen eingeschlossen. Eine Maschine mit Hohlgussgehäuse zeigt Fig. 483 und eine solche mit vertikaler Welle Fig. 484. In den Figg. 485—496 ist in sehr ausführlichen Zeichnungen die gesamte Detailkonstruktion der neuesten Maschinen der Firma Siemens & Halske zusammengestellt, die als Erläuterung für verschiedene (in früheren Abschnitten behandelte) Gesichtspunkte dienen können, ohne dass im Text eine erschöpfende Beschreibung gegeben werden kann. Es sei nur aufmerksam gemacht auf die Konstruktion des kastenförmigen Hohlgussgestelles, auf die Befestigung der Ankerbleche an demselben mittels durchgehender Bolzen, auf die Ventilationskanäle im äusseren Teil, auf die interessante Befestigung der

lamellierten Pole, die einen achsialen Schlitz mit einem Einsatzstück besitzen, so dass die Spulen auf der Drehbank gewickelt werden können. Die Nabe ist gesprengt und durch Schrumpfringe aufgezogen. An den Schleifringen

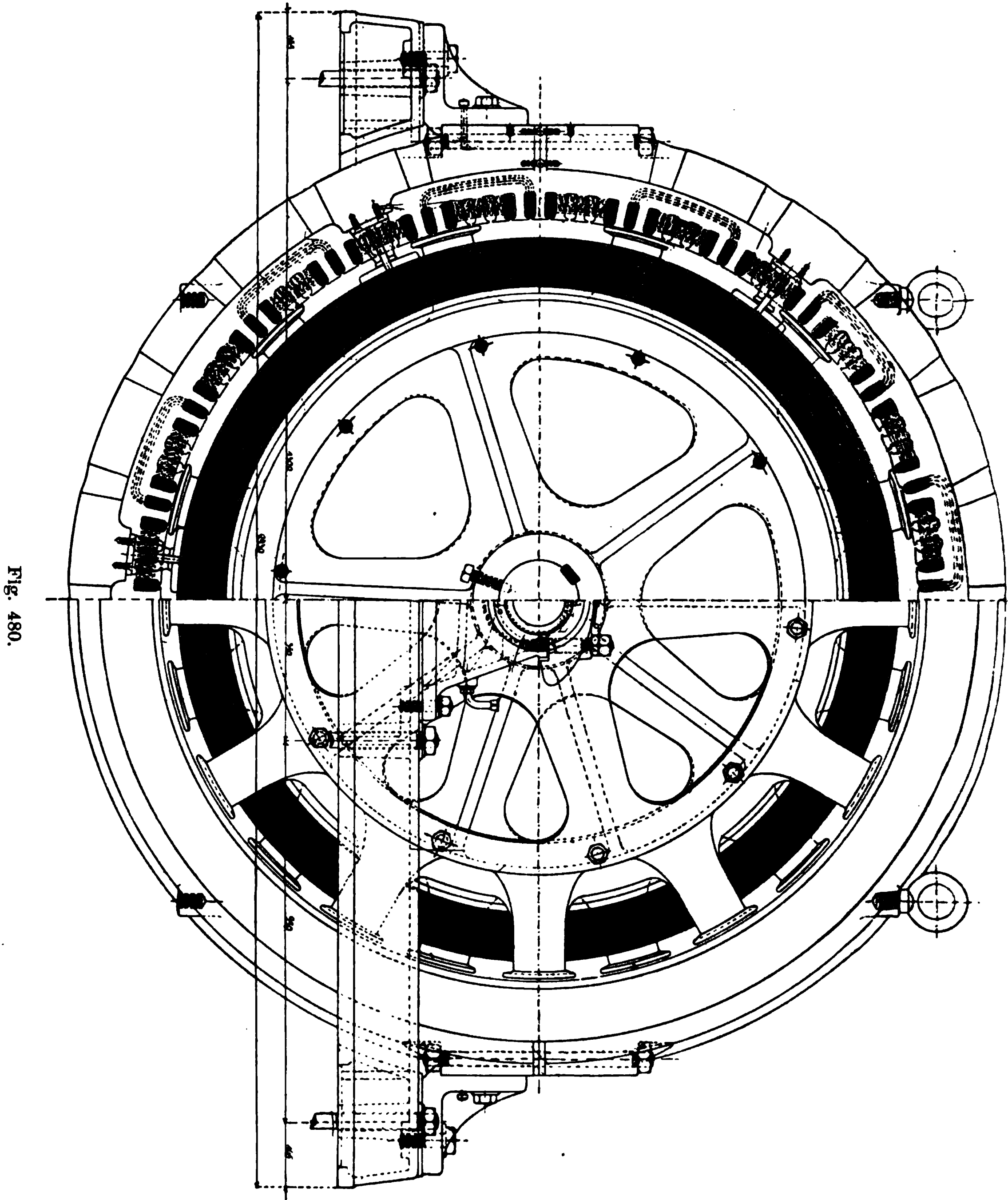


Fig. 480.

(Fig. 492) sind die Schrauben zum Zusammenhalten abwechselnd zur Stromabnahme eingerichtet. Bürstenträger und -zapfen ist in Fig. 493 und in Fig. 496 der Erregerspulenkasten gezeichnet. Die Nuten-, Blech- und Pol-

form ist in Fig. 491 gegeben, die Stromausführungsklemmen und Konsolen in Fig. 494 u. 495: unten an den Bolzen sind die Drahtenden der Maschinenwicklung, oben die Abführungsleitungen angeschlossen, der Bolzen ist rings von Isolationsmaterial umgeben. In Fig. 495 ist *A* ein Isolierstück aus Porzellan, *B* ein Kupferbolzen, *C* Muttern aus Eisen, *D* verzinnte Messing-

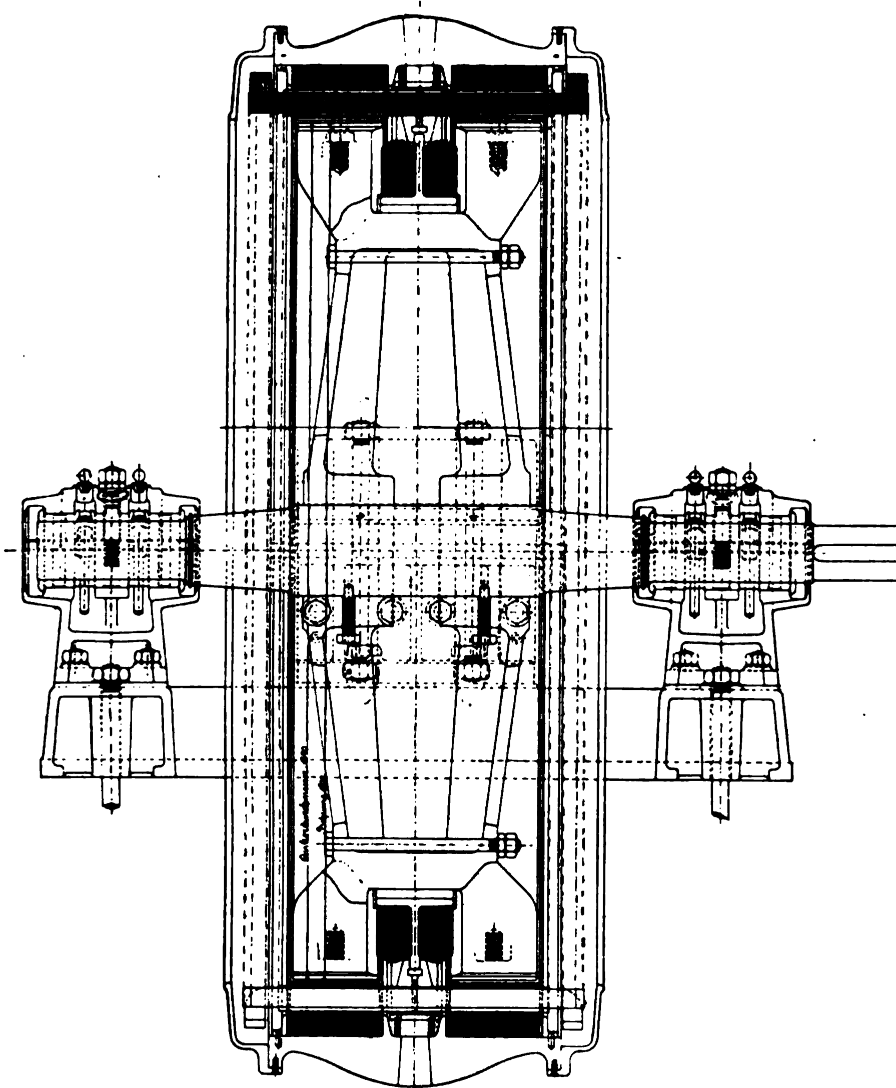


Fig. 481.

scheibe, *E* Arbeitsscheibe, *F* Kappe aus ADT'scher Masse, *G* Knopf aus Porzellan, *H* Messinghülse.

In Fig. 497—499 ist noch der Pariser Ausstellungsgenerator[1]) (2000 KW Drehstrom, 50 Perioden, 2000 Volt, 83,5 Touren) der Firma SIEMENS & HALSKE dargestellt:

1) Nach den Nachrichten von SIEMENS & HALSKE, E. T. Z. 1900.

Das Feldmagnetsystem besteht aus einem zweiteiligen, gusseisernen Kranz (Fig. 499), der durch angegossene Speichen mit der Nabe zusammenhängt und direkt auf die verlängerte Welle der Dampfmaschine aufgekeilt ist. Die 64 Pole sind aus Eisenblechen hergestellt, welche durch drei Bolzen

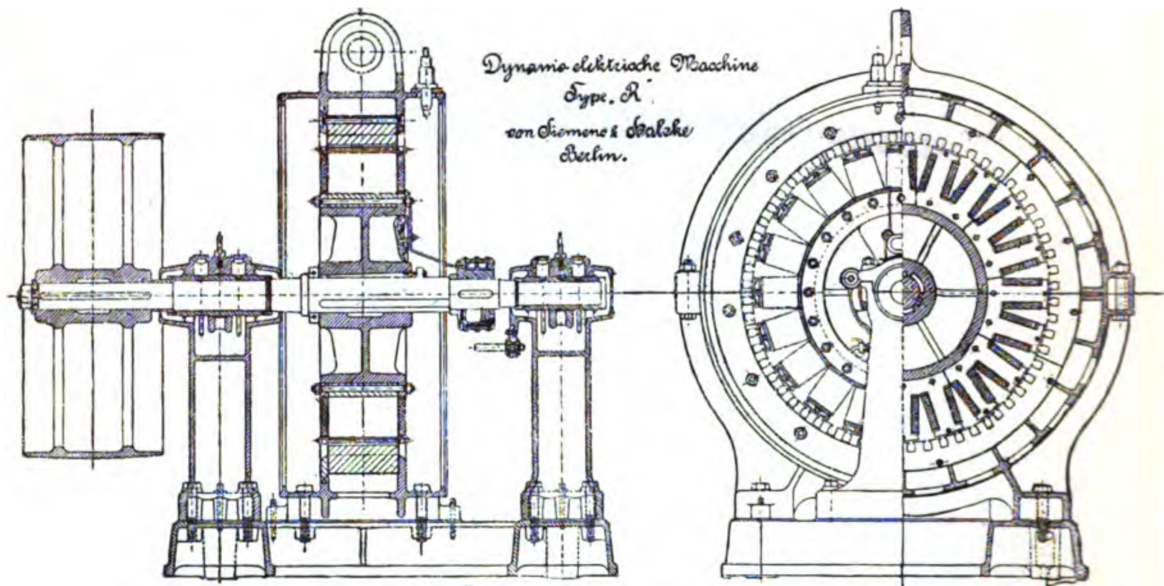


Fig. 482.

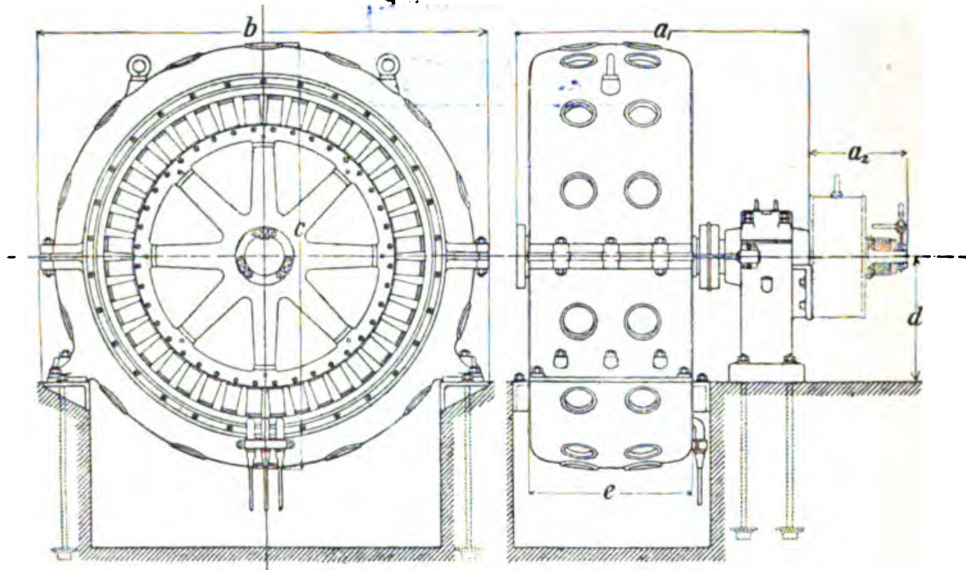


Fig. 483.

und ein Stahlprisma von quadratischem Querschnitt fest zusammengehalten werden (Fig. 498). Das Stahlprisma enthält das Muttergewinde für die von innen durchgezogenen Schrauben, welche die Pole mit dem gusseisernen Kranz verbinden. Zur Aufnahme der tangentialen Kräfte dient ein pris-

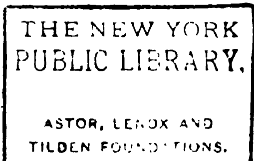
487.

D.

E.

Handb. d. Elektrotechnik IV. Bd.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.



matischer Ansatz an den Polen, der in eine entsprechende Nut im Radkranz eingreift.

Die Bewicklung der Feldmagnete besteht aus hochkantig gewickeltem Flachkupfer von 4 × 23 mm Querschnitt. Auf jeden Pol sind 40 Windungen gelegt; das Gesamtkupfergewicht der Feldmagnetbewicklung beträgt 4000 kg.

Zur Ventilation und Kühlung der Magnete ist nachstehende Anordnung benutzt worden. An beiden Stirnseiten legt sich die Kupferbewicklung um hohle Gussstücke aus Bronze. Die Luft streicht bei der Bewegung des Magneten in radialer Richtung durch diese Hohlräume und führt die sich entwickelnde Wärme ab. Zu dem gleichen Zwecke haben auch die Feldmagnet-

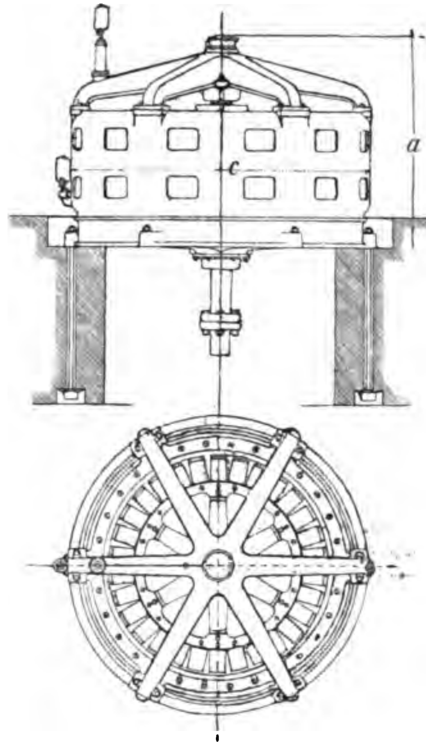


Fig. 484.

kerne in der Mitte einen Luftspalt erhalten, welcher beständig frische Luft in den Raum zwischen Anker und Schenkeleisen leitet.

Für die Erregung der Feldmagnete sind im Maximum 210 Volt erforderlich, denen eine annähernd gleich grosse Ampèrezahl entspricht, da der Gesamtwiderstand der Feldmagnetbewicklung rund 1 Ohm ist; der mittlere Energieverbrauch für die Erregung ist 28 000 Watt, der höchste 42 500 Watt.

Man hatte sich zur Aufgabe gestellt, dem Anker eine möglichst einfache mechanische Form zu geben, gleichzeitig aber ein Mittel zu finden, welches die genaue Centrierung des Ankers bei der Montage und, sofern dies durch eine Veränderung der Lager erforderlich werden sollte, die leichte Nachstellung gestattet.

Zu diesem Behufe ist man wie folgt verfahren. Man denke sich eine kurze hohle Walze, welche auf zwei, passend von einander entfernte Rollen

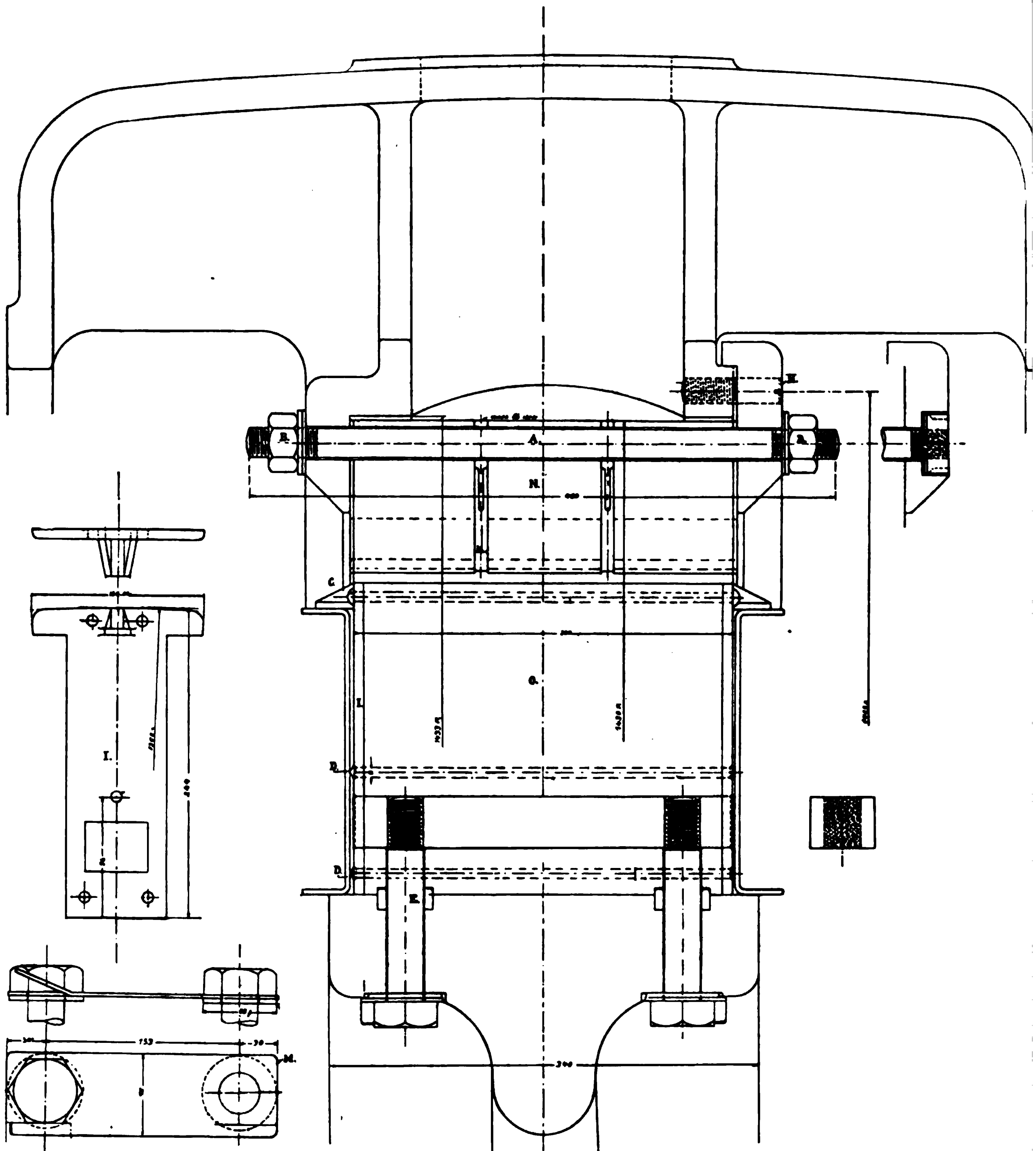


Fig. 489.

Fig. 488.

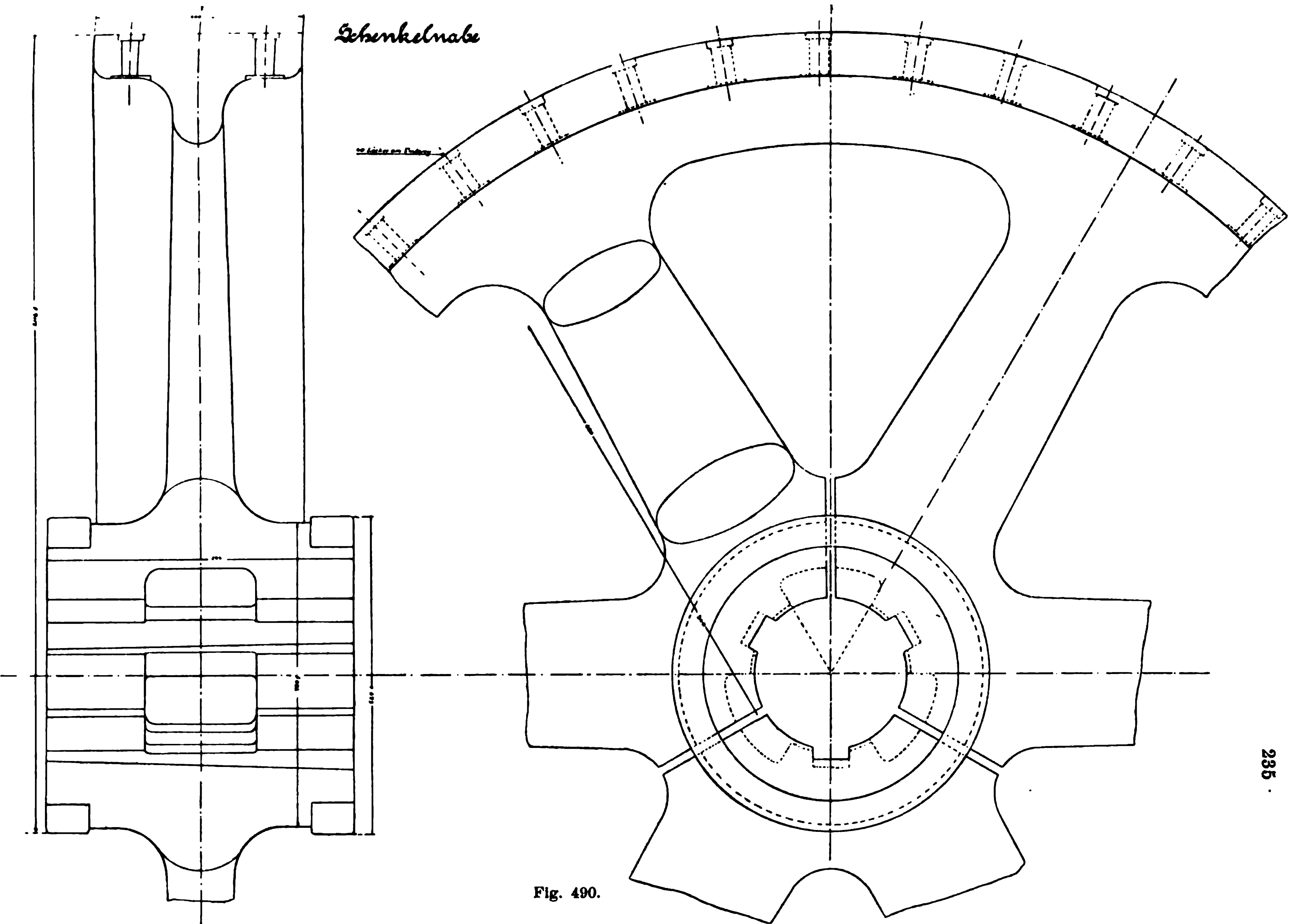


Fig. 490.

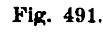
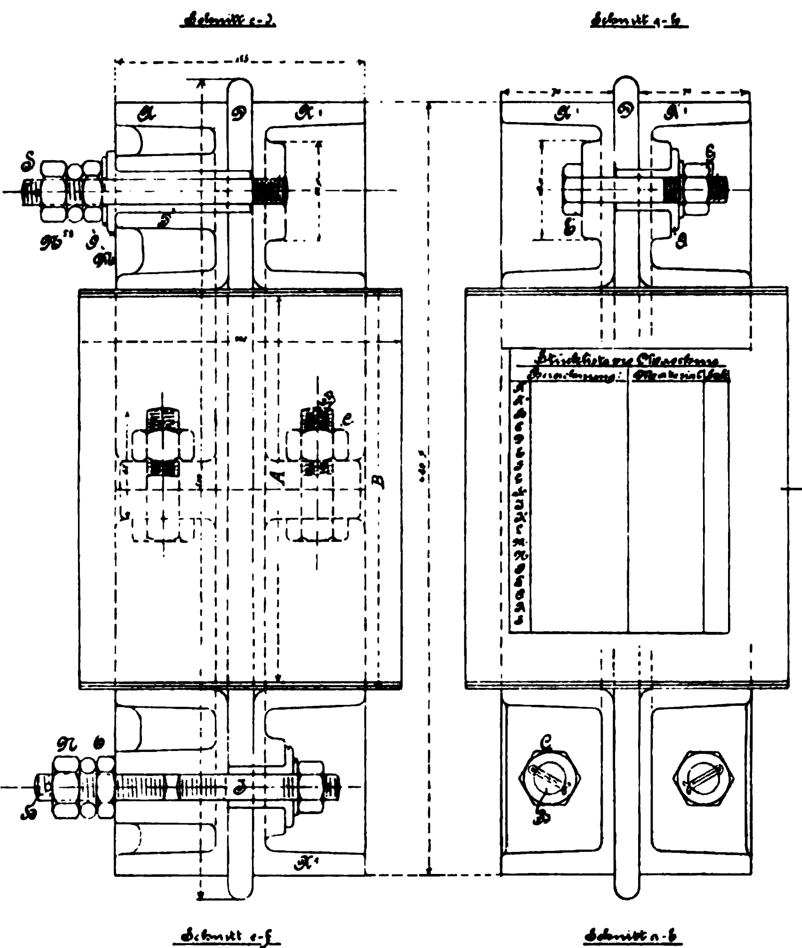

295.49
295.49
pro Umfang 10 Bleche
35
40 Pole
809.13
883.29
244
1302
1058
1310
1412
1430
120

Fig. 491.

Schleifringe zur „R" 130/40



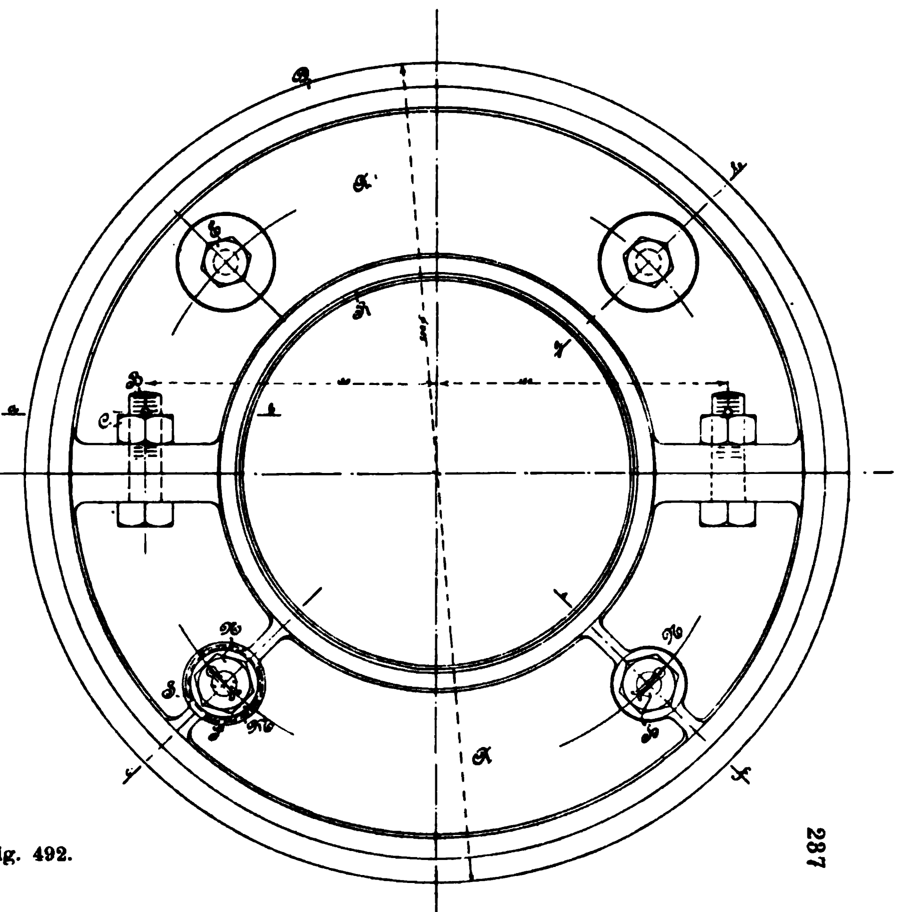
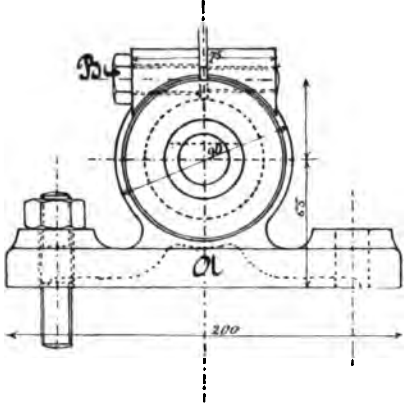
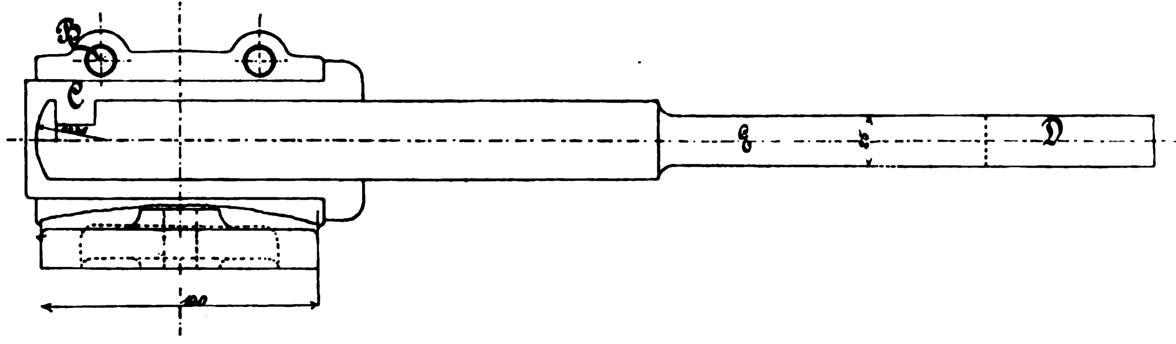
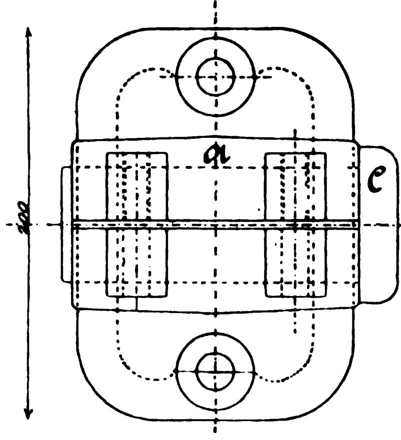


Fig. 492.

Bürstenträgerconsol nebst Achsen für die „R" Maschinen.







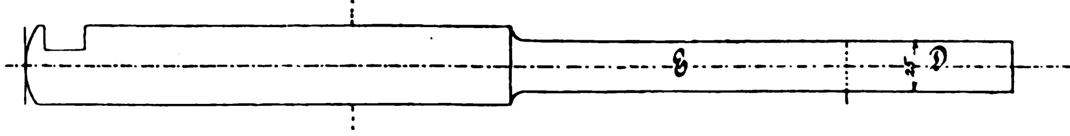


Fig. 493.

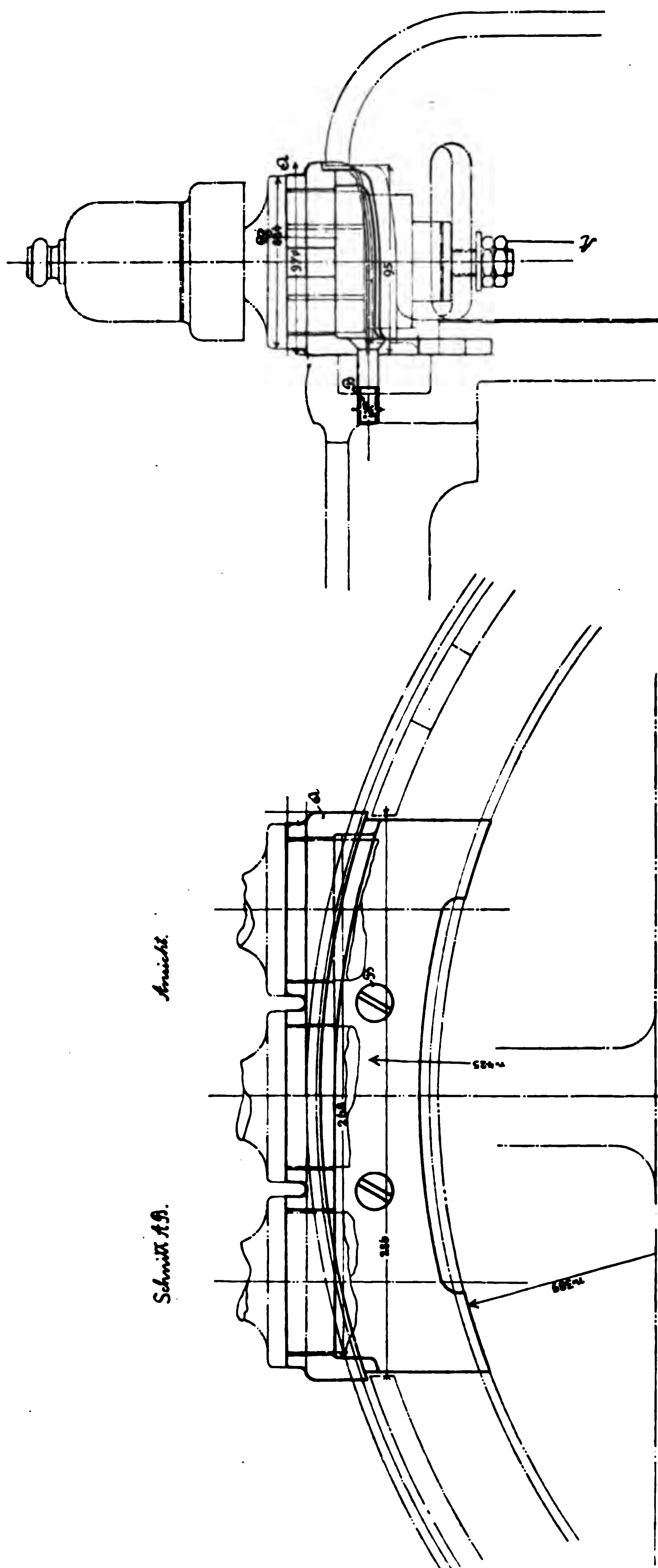


Fig. 494.

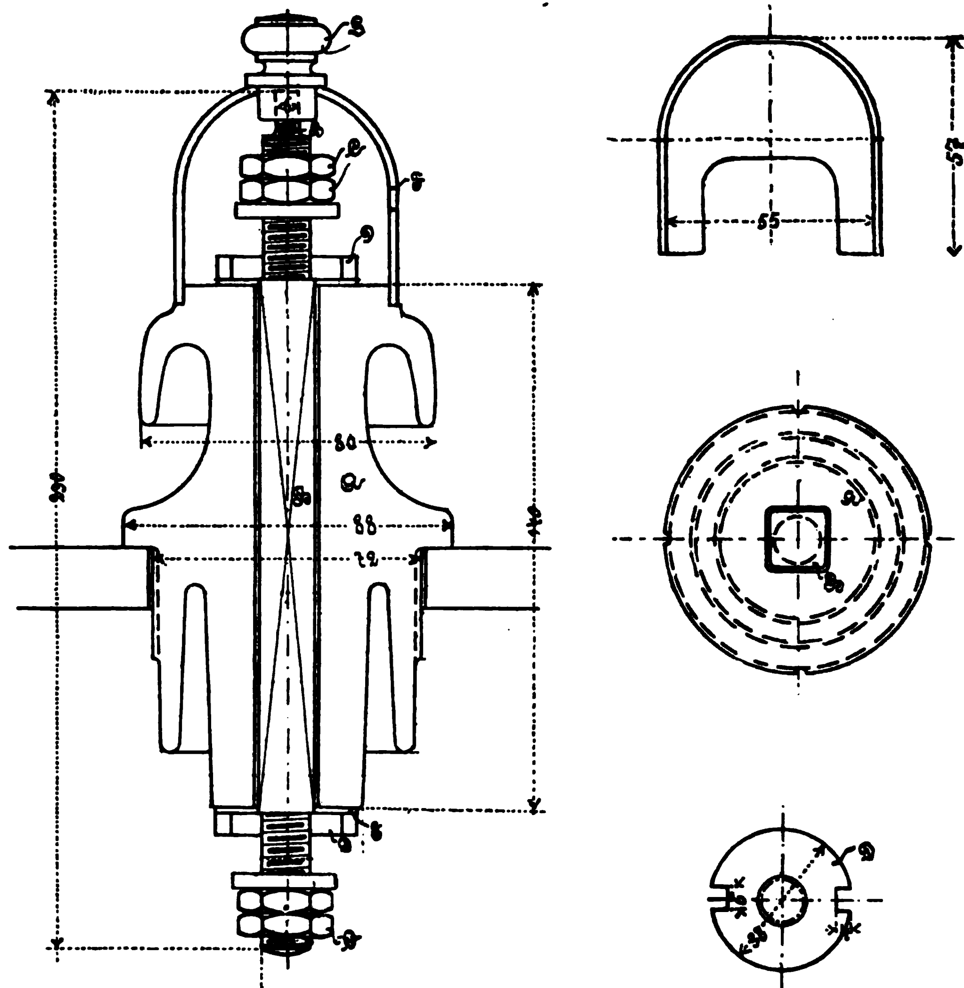


Fig. 495.

gesetzt ist und in diesem Lager ruht. Die Rollen können einzeln oder gleichzeitig gehoben oder gesenkt werden. Es ist nun klar, dass die gleichzeitige Hebung oder Senkung dieser Lagerrollen eine entsprechende vertikale Verschiebung der auflagernden Walze bewirken wird. Hebt oder senkt man nur eine der beiden Rollen, oder hebt man die eine und senkt gleichzeitig die andere, so wird die centrale Achse der Walze in horizontaler Richtung verschoben. Man kann also durch diese einfache Vorrichtung die centrale Achse der Walze innerhalb gewisser Grenzen vertikal und horizontal verstellen und in dieser Weise die Walze centrieren. Was hier kurz „Walze" genannt wurde, ist nun in folgender Weise konstruiert. Durch einen inneren und einen äusseren Ring (Fig. 499), welche durch starke radiale Speichen miteinander verbunden sind,

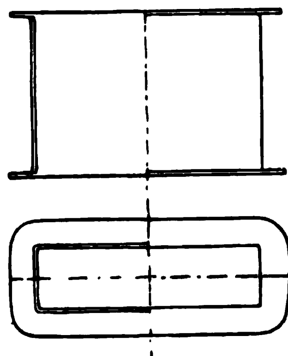


Fig. 496.

wird ein flacher Kranz gebildet, welcher aussen und innen abgedreht ist. Zwei solche, genau gleiche Kränze sind parallel und conachsial nebeneinander gestellt und werden durch den zwischenliegenden Anker mit einander zu einem festen Ganzen verbunden. Jeder der beiden Tragekränze lagert in vorher geschilderter Weise, wie man aus Fig. 497 erkennen wird, auf zwei Rollen. Damit aber die grosse Walze, welche die mit einander verbundenen

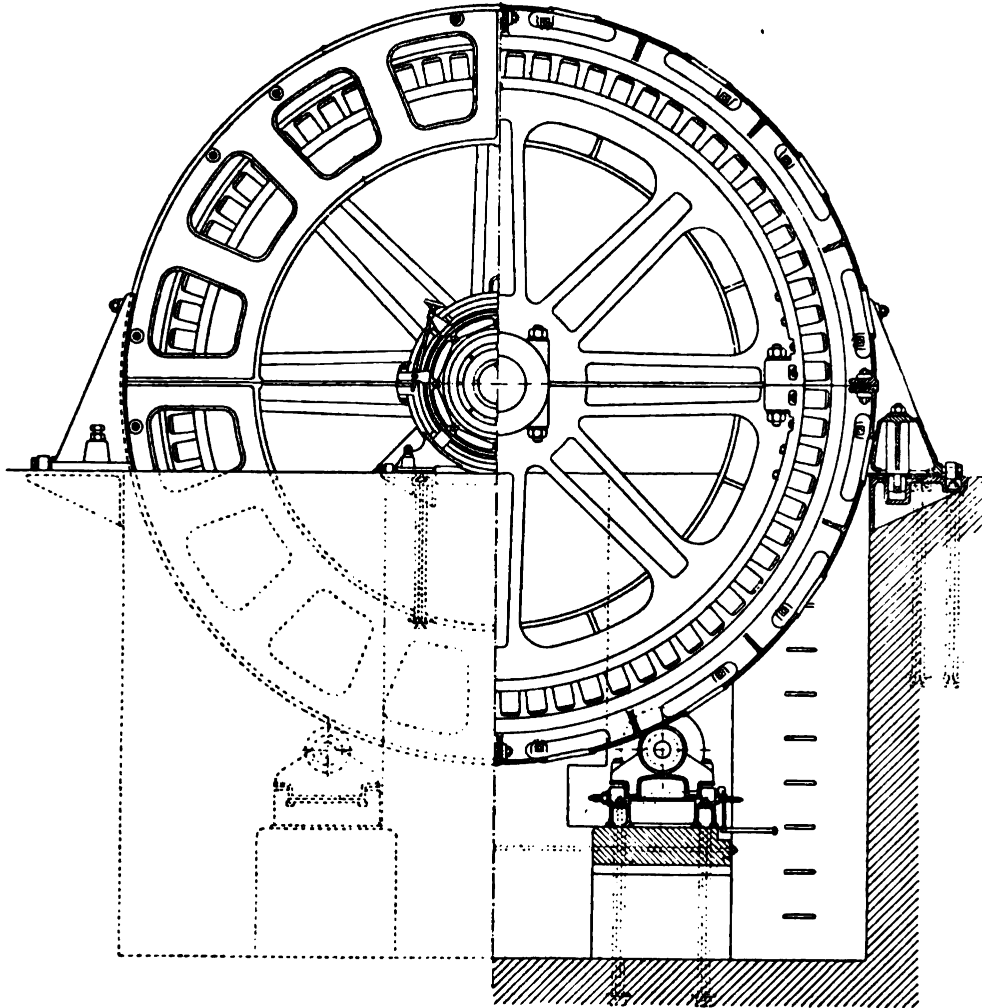


Fig. 497.

Tragekränze darstellen, nicht auf ihrem Rollenlager sich drehen kann, wird sie nach erfolgter Centrierung an seitlich angebrachten Böcken festgeschraubt. Diese Böcke verhindern gleichzeitig auch die Bewegung des Ankers in der Richtung der Welle. Für die Bethätigung der Centriervorrichtung hat man natürlich die Verschraubung mit den Böcken zu lösen.

Der zwischen den beiden Tragekränzen liegende Ankerkern besteht aus Blechen von 0,5 mm Dicke, die von geeigneten Gussstücken zusammengehalten und getragen werden. Dieser Anker und ebenso die Tragkränze

sind aus vier Quadranten zusammengesetzt. Die Abmessungen der Tragkränze sind derart gewählt, dass eine wesentliche Durchbiegung und ein Unrundwerden nicht stattfinden kann.

Als Bewicklung hat der Anker 648 Nuten von 13 mm Breite und 55 mm Tiefe erhalten, in welche je ein Kupferstab von 7 × 44 mm Querschnitt ein-

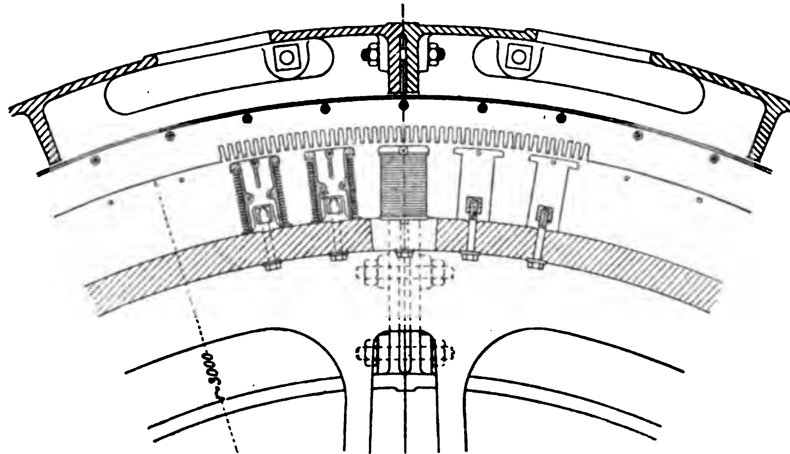


Fig. 498.

gelegt wird. Die Nuten sind so gestanzt, dass sich in dieselben am offenen Ende nach Einlegung des Kupferstabes ein isolierender Deckel einschieben lässt. Die Isolation der Kupferstäbe besteht aus Glimmer, welcher unmittelbar um die Stäbe gepresst ist. Sämtliche Stäbe je eines Zweiges sind hinter-

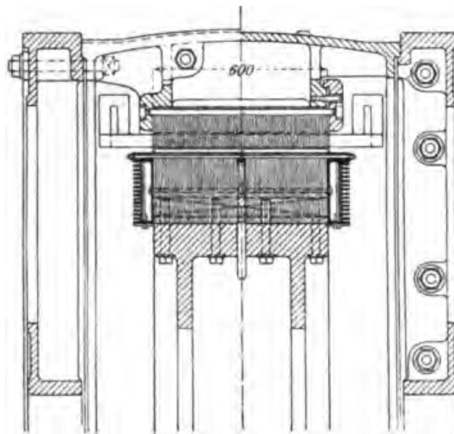


Fig. 499.

einander geschaltet und die drei Zweige in Sternschaltung miteinander verbunden. Das Gesamtgewicht des Ankerkupfers beträgt 2400 kg, der Gesamtwiderstand der warmen Wicklung 0,057 Ohm, die Stromwärme etwa 15 000 Watt.

Die Erregermaschine, eine achtpolige Gleichstrommaschine mit Reihenschlusswicklung von 45 KW bei 210 Volt, ist eine Aussenpolmaschine mit Trommelanker.

64. Wechselstrommaschinen österreich-ungarischer Firmen.

Ende der achtziger Jahre begann die Firma Ganz & Co. in Budapest § 238.
den Bau einer Wechselstrommaschine mit Zackenanker und rotierendem Ganz & Co.
Innenpolkranz, die eine ausgedehnte Verwendung gefunden hat.

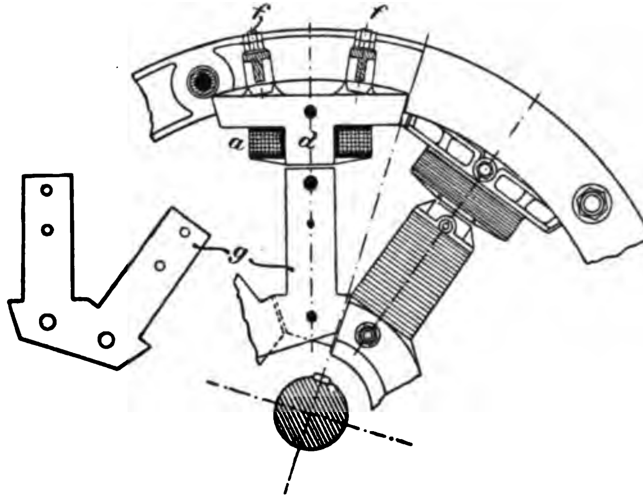


Fig. 500.

Die Figg. 500 u. 501[1]) lassen Wesen und Konstruktion dieser Maschine erkennen. Die stillstehenden Armaturspulen *a* sitzen auf Eisenkernen *d*, die aus $^1/_2$ mm starken **T**-förmigen Blechen und Papierzwischenlagen zusammen-

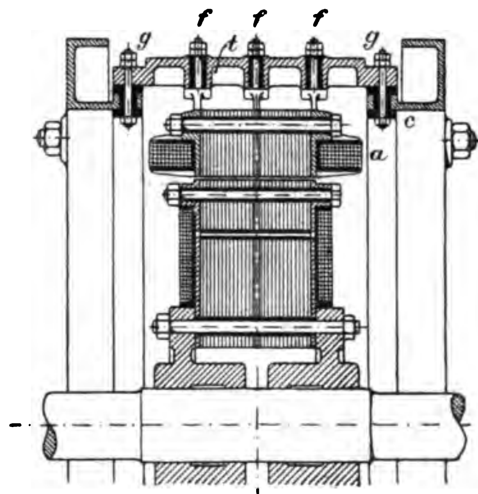


Fig. 501.

gesetzt sind und durch Bolzen und seitliche bronzene Pressstücke zusammengehalten werden. Die Eisenkerne sind mittels der Bolzen *f*, *f* an den Trägern *t*

1) Nach M. von Hoor Z. V. D. J. 1896.

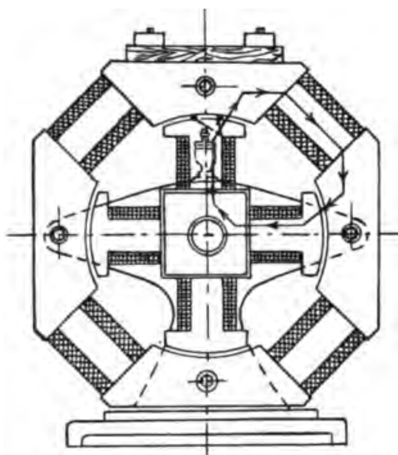


Fig. 502.

befestigt, die durch Bolzen *g*, *g* und isolierende Hartholzbüchsen *c* mit den seitlichen Rahmen der Maschine verbunden sind. Der Eisenkörper der Armatur wird also aus einer Reihe solcher **T**-förmiger Kerne gebildet, deren dem wagerechten Balken des Buchstabens entsprechende Teile ein geschlossenes Vieleck bilden, während die die Spulen tragenden Ansätze radial stehen. Die Spulen sind auf Kartonspulenhalter gewickelt und durch Bronzestücke auf den Kernen festgehalten.

Das speichenförmige Magnetrad wird aus **V**-förmigen, $^1/_2$ mm starken Blechstücken mit Papierzwischenlagen hergestellt, die so übereinander gelegt werden, dass je ein linksseitiger Zweig über den rechtsseitigen Zweig des folgenden Bleches fällt und somit eine geschlossene geometrische Figur mit radialen Kernen entsteht. Diese **V**-förmigen Bleche werden von starken Pressplatten und Bolzen zusammengehalten und bilden mit der zweiteiligen Nabe ein festes Stück. Die Magnetspulen werden auf Zinkspulenhalter mit Pressspanumhüllung gewickelt, fertig auf die Eisenkerne aufgeschoben und durch zweckmässig geformte bronzene Stücke niedergehalten. Der Strom wird den Spulen des Magnetrades bei den kleinen Maschinen von den Schleifringen weg durch die hohle Welle, bei grösseren Maschinen unmittelbar von den neben dem Magnetrade innerhalb der Lager sitzenden Schleifringen zugeführt.

1886 wurden solche Maschinen, von Riemen angetrieben, in Treviso parallel geschaltet; es folgte Rom, wo im Jahre 1888 das erstemal von

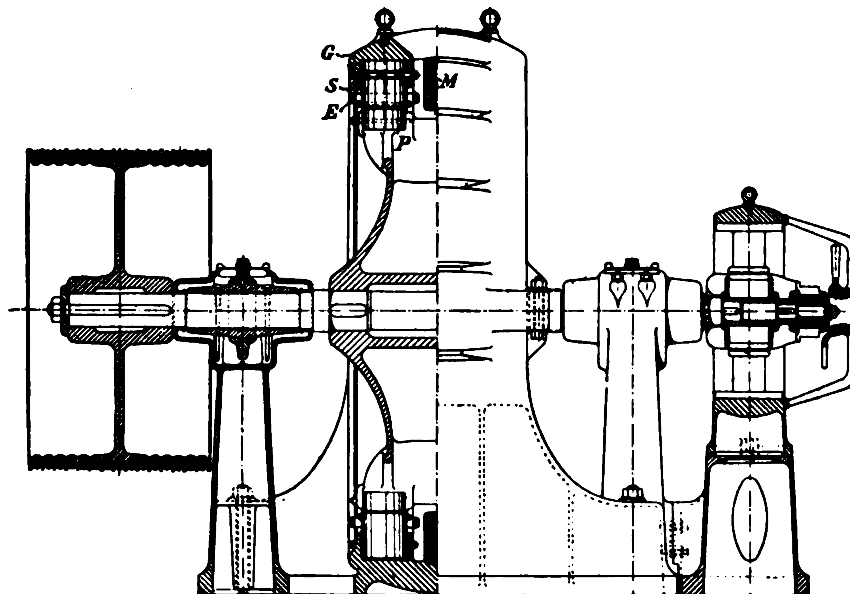


Fig. 503.

Dampfmaschinen unmittelbar angetriebene Wechselstrommaschinen parallel geschaltet wurden, später Marienbad, Innsbruck etc.

Der Spannungsabfall dieser Type ist allerdings besonders bei induktiver Belastung beträchtlich. Der Kurzschlussstrom ist etwa der 1,5 fache des

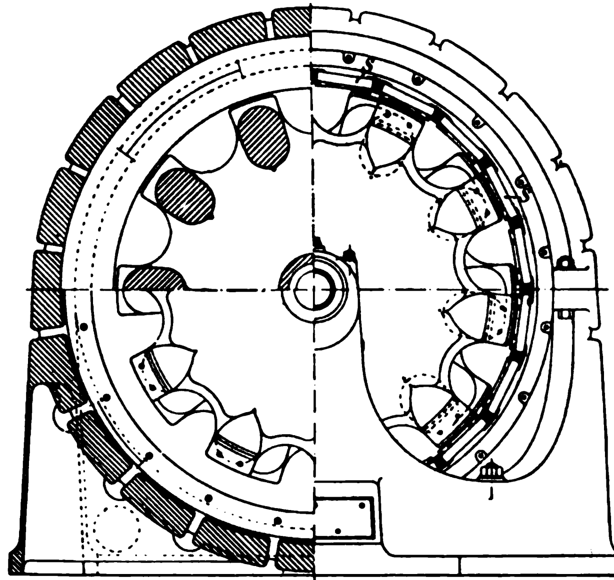


Fig. 504.

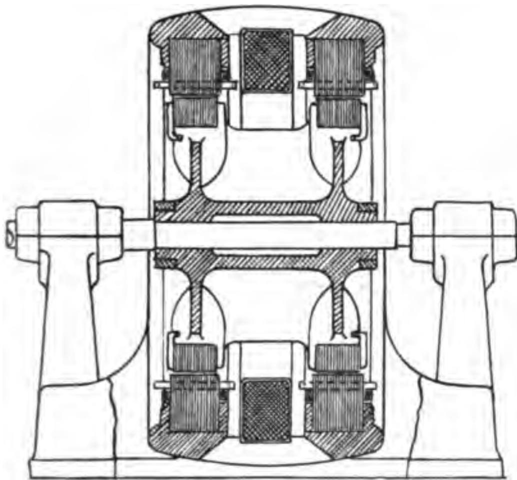


Fig. 505.

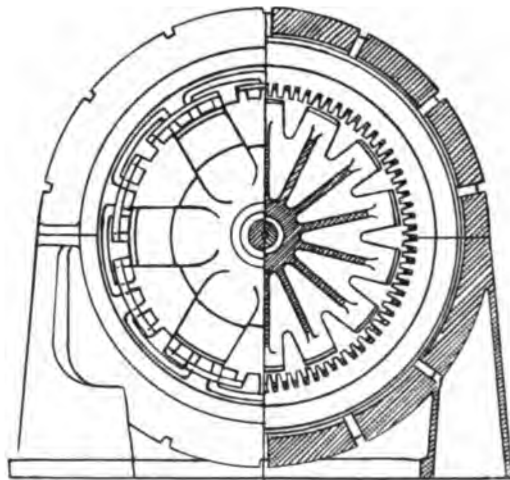


Fig. 506.

normalen. Ein kleineres Modell in vierpoliger Ausführung giebt Fig. 502.[1]) Diese Maschinen geben sehr spitze Spannungskurven und sind an sich auf Einphasenstrom beschränkt.

Im Jahre 1895 ging die Firma zum Bau der Gleichpoltype (Fig. 503 u. 504) über.

1) Nach Rössler, E. T. Z. 1896.

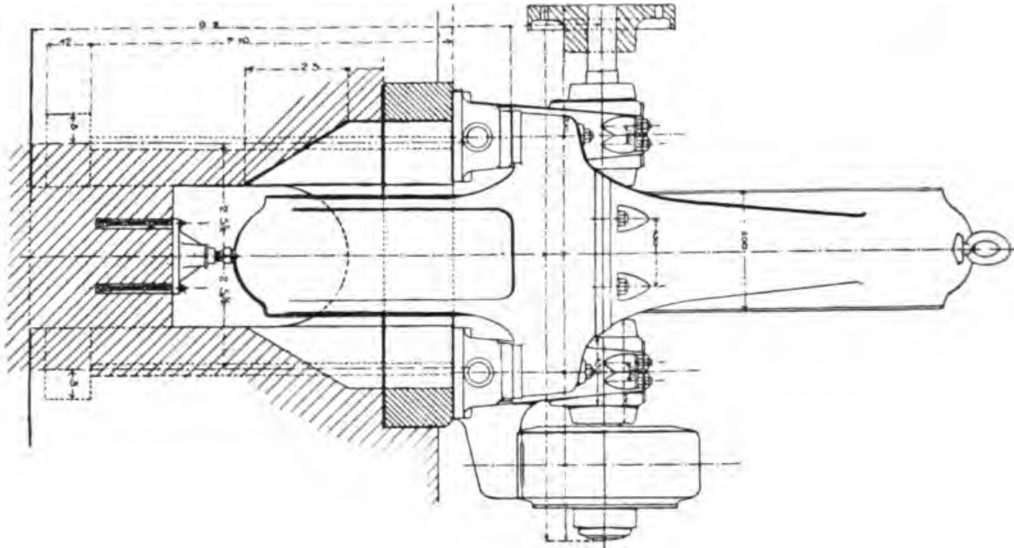


Fig. 507.

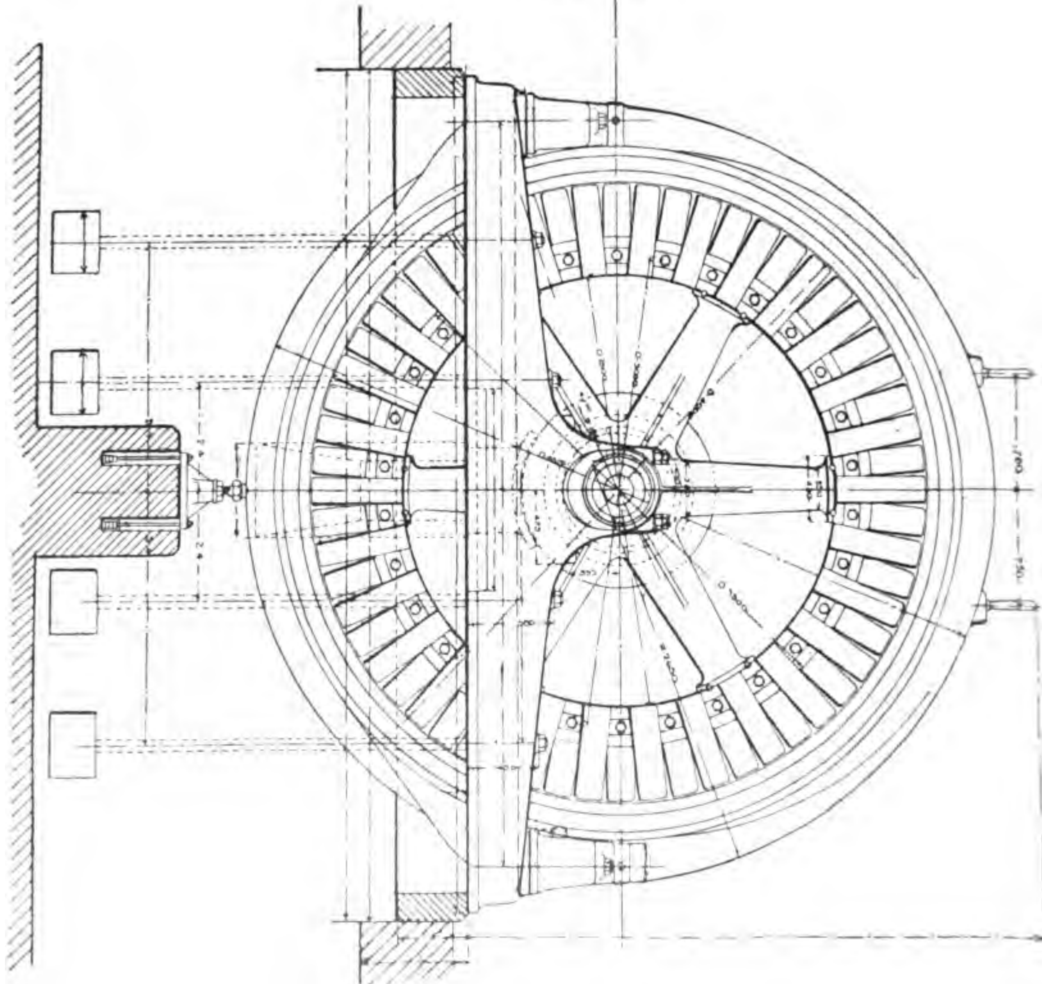


Fig. 508.

Die Art der Befestigung der aus überlappten Blechen gebildeten Kerne im Gussmantel sowie der Polstücke des Magnetrades ist aus den Figuren ohne weiteres zu erkennen. Die von den Spulen umschlossenen Fortsätze beider Armaturseiten sitzen einander achsial gegenüber, sodass die Induktion

Fig. 510.

in den beiden entsprechenden Spulen gleichzeitig ihren höchsten oder geringsten Wert annehmen würde, wenn sich die Polfortsätze an dem Magnetkranze ebenfalls gegenüberständen. Nun sind aber die Polfortsätze um die Hälfte des Polmittenabstandes aus dieser Lage herausgedreht (Fig. 504), sodass die grösste Induktion in den beiden Armaturhälften zeitlich um $^1/_4$ Periode verschoben auftritt. Die um $^1/_4$ Periode verschobenen elektromotorischen Kräfte werden mittels der bekannten Scottschaltung zu drei um 120° verschobenen elektromotorischen Kräften vereinigt, sodass also auf diese Weise ein Dreiphasengenerator entsteht. Die Windungszahl der Spulen der ersten Armaturhälfte verhält sich zu jener der zweiten Hälfte wie $2 : \sqrt{3}$.

Fig. 509.

Fig. 511.

In Fig. 505 u. 506 ist an dieser Type eine interessante Neuerung vorgesehen: Die beiden Polräder haben verschiedene Polhörnerzahl, sodass in den beiden Ankerwicklungen Ströme verschiedener Frequenz erzeugt werden. Die hohe Frequenz dient zum Lichtbetrieb, die geringe Frequenz für Motorenbetriebe; letztere Wicklung ist jedenfalls mehrphasig.

Die grosse, einphasige Induktortype (Fig. 507 u. 508) von 475 Kilovoltampère, 100 Touren, wurde für Leicester (England) geliefert; sie ist direkt mit der Dampfmaschine gekuppelt. An den gusseisernen Armen (Fig. 509) ist ein Stahlring befestigt, an den abwechselnd links und rechts

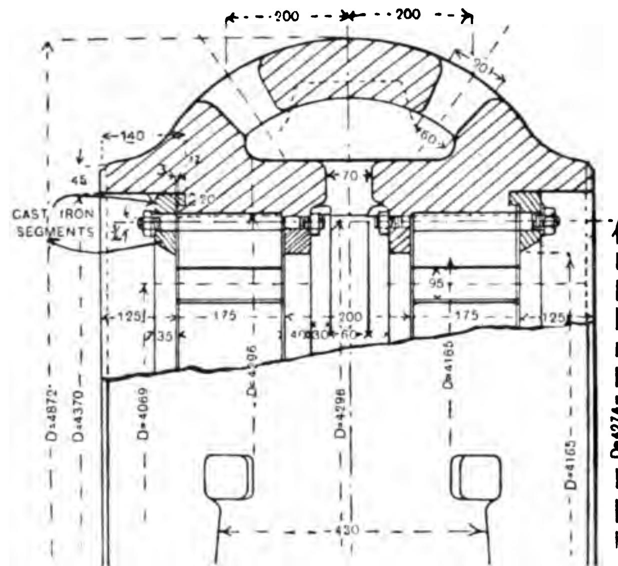


Fig. 512.

die Polhörner geschraubt sind. In die Polhörner sind oben Blechpackete eingesetzt (Fig. 510). Die Löcher sind mit Zink ausgegossen. Die induzierte Wicklung liegt in runden Nuten (Fig. 511). Die Ankerbleche bestehen aus

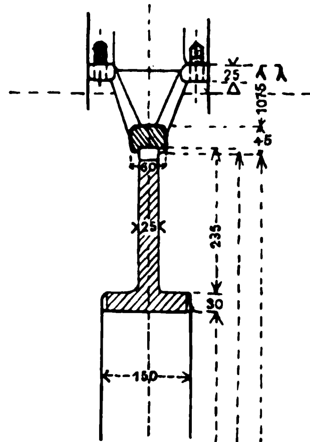


Fig. 513.

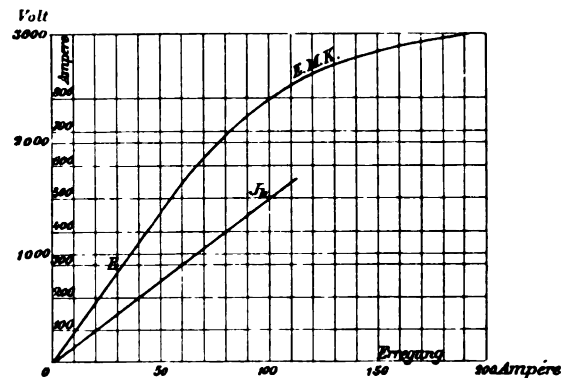


Fig. 514.

einzelnen Segmenten. Aus Fig. 512 ist der Zusammenbau des festen Teiles ersichtlich. Die Bleche sind so gelegt, dass die Fugen abwechseln; nur in einer horizontalen Ebene ist die Maschine geteilt. Die Nuten sind mit 4 mm starken Mikanithülsen ausgefüttert, die eine Probe von 30000 Volt ertrugen.

Diese Hülsen ragen ziemlich weit über die Nuten heraus, um ein Überschlagen zu vermeiden. In jeder der 60 Nuten liegen 11 Kabel aus 19 Drähten, 1,8 mm stark. Die Wicklung ist von Hand ausgeführt. Die stehende grosse Erregerspule ist auf einen T-förmigen Rahmen (Fig. 513) gewickelt, der am Gehäuse angeschraubt ist. Es sind 144 Windungen von 10 mm Drahtdurchmesser. Die vierpolige Erregerdynamo sitzt auf der Maschinenwelle und ist imstande, 200 Ampère bei 85 Volt zu liefern. Die Leerlauf- und Kurzschlusscharakteristik sind in Fig. 514 niedergelegt.

Der Dreiphasengenerator (Fig. 515—517) ist wohl die grösste in Europa hergestellte Maschine, sie ist in Tivoli aufgestellt und leistet bei 210 Touren 3500 Kilovoltampère unter einer Spannung von 10000 Volt. Das rotierende Polrad besitzt aufgeschraubte Pole mit geblätterten Polschuhen. Der Radius der Pole ist kleiner als der Polradhalbmesser, so dass der Luftzwischenraum von der Polmitte nach aussen zunimmt. Der stehende Teil zeigt offene Nuten, in denen die Wicklung durch Keile festgehalten ist. Das aktive Eisen ist von einer Reihe Luftkanäle durchsetzt. Diese Kanäle sind durch Distanzstücke, die auch die Zähne umfassen, festgelegt. Das ganze Gehäuse, dessen kastenförmige, zweiteilige Konstruktion recht beachtenswert ist, kann vermittelst zweier Spindeln zu Zwecken der Reparatur auf die Seite gefahren werden. Die sechspolige Erregermaschine sitzt auf der Generatorachse fliegend.

Die Figg. 518—520 zeigen einen Zweiphasengenerator von 1300 Kilovoltampère bei 420 Touren für die Centrale Innsbruck. Auf das rotierende Rad ist ein Polring aus Stahl aufgezogen, auf die einzelnen Pole sind massive Polschuhe aufgeschraubt. Die Ankernuten sind halb geschlossen.

Der Einphasengenerator Fig. 521—524 für 250 KW, 420 Touren, 8500 Volt, gehört als Synchronmotor zu einem Gleichstrom-Wechselstromumformer in Rom. Die Leitung von der Erregermaschine bezw. von den Schleifringen verläuft in der hohlen Achse zu der Erregerwicklung des rotierenden Schenkelsterns.

Die kleineren Maschinen der Elektricitäts-Aktien-Gesellschaft, § 330. Kolben & Co.
vorm. Kolben & Co. in Prag, gehören der Induktortype an (Fig. 525). Sie besitzen die bei Dynamos besonders schätzbare Eigenschaft, dass der rotierende Teil derselben keine Bewicklung, daher auch keine stromführenden Teile, Kontaktringe oder Bürsten trägt. Der rotierende Teil ist ein einfaches Stahlgussrad, welches direkt auf der Maschinenwelle aufgekeilt und mit einer Anzahl von Vorsprüngen, den Polhörnern, versehen ist. Sämtliche Wicklungen sind in dem feststehenden Teile untergebracht und dort solid befestigt. Durch diese Disposition wird eine grosse Betriebssicherheit erzielt und die Abnutzung der Maschine auf ein Minimum reduziert. Auch ermöglicht diese Anordnung die Wahl einer bedeutenden Umfangsgeschwindigkeit bei grossem Gewichte des Ankerrades, wodurch ein hoher Gleichförmigkeitsgrad des Antriebes erzielt wird, ohne dass der Antriebsmotor selbst schwere Schwungmassen erhalten muss. Dieser Umstand ist besonders wichtig bei der direkten Kupplung der Dynamos mit Dampfmaschinen, Turbinen oder Gasmotoren, da hierdurch die Anschaffung eines besonderen Schwungrades entfällt und an Raum gespart wird.

Die Spulen, welche den erzeugten Wechselstrom führen, sind auf der Wickelbank in Formen gewickelt und in tiefe Nuten des Eisenkörpers eingelegt. Dieselben können bequem ohne die Zuhilfenahme eines besonderen Werkzeuges eingesetzt oder herausgenommen werden; der Ersatz einer zu-

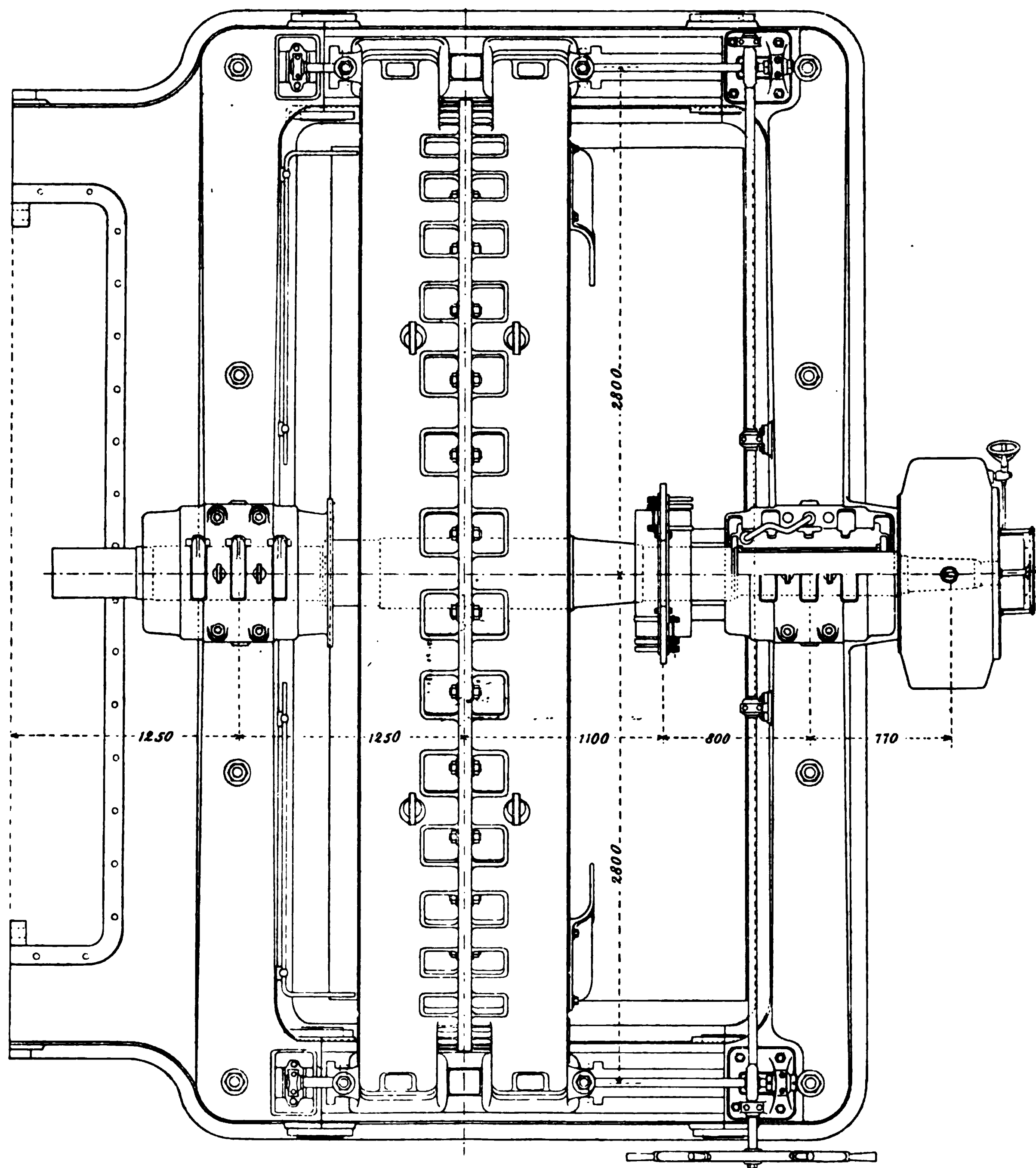
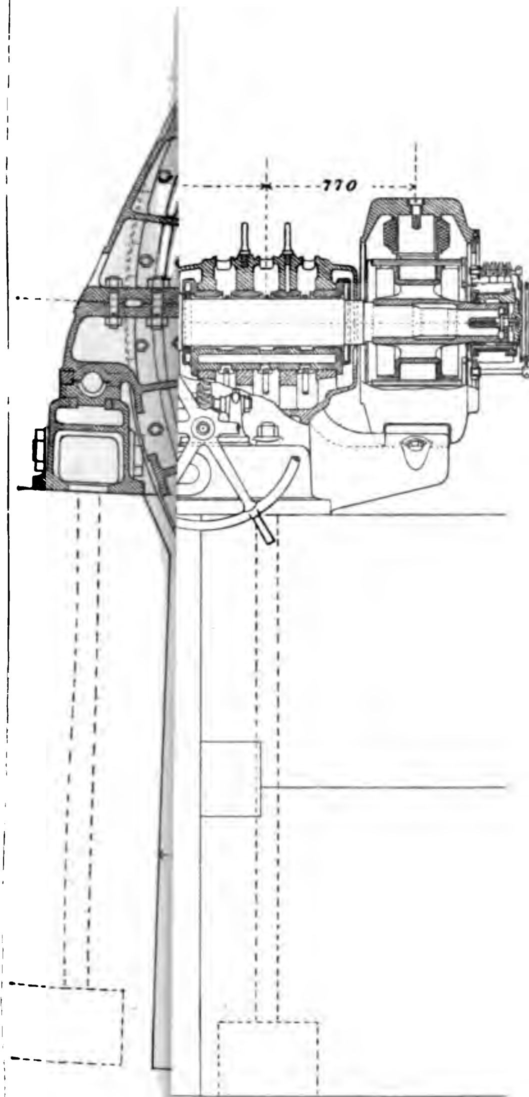


Fig. 517.

516.



Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

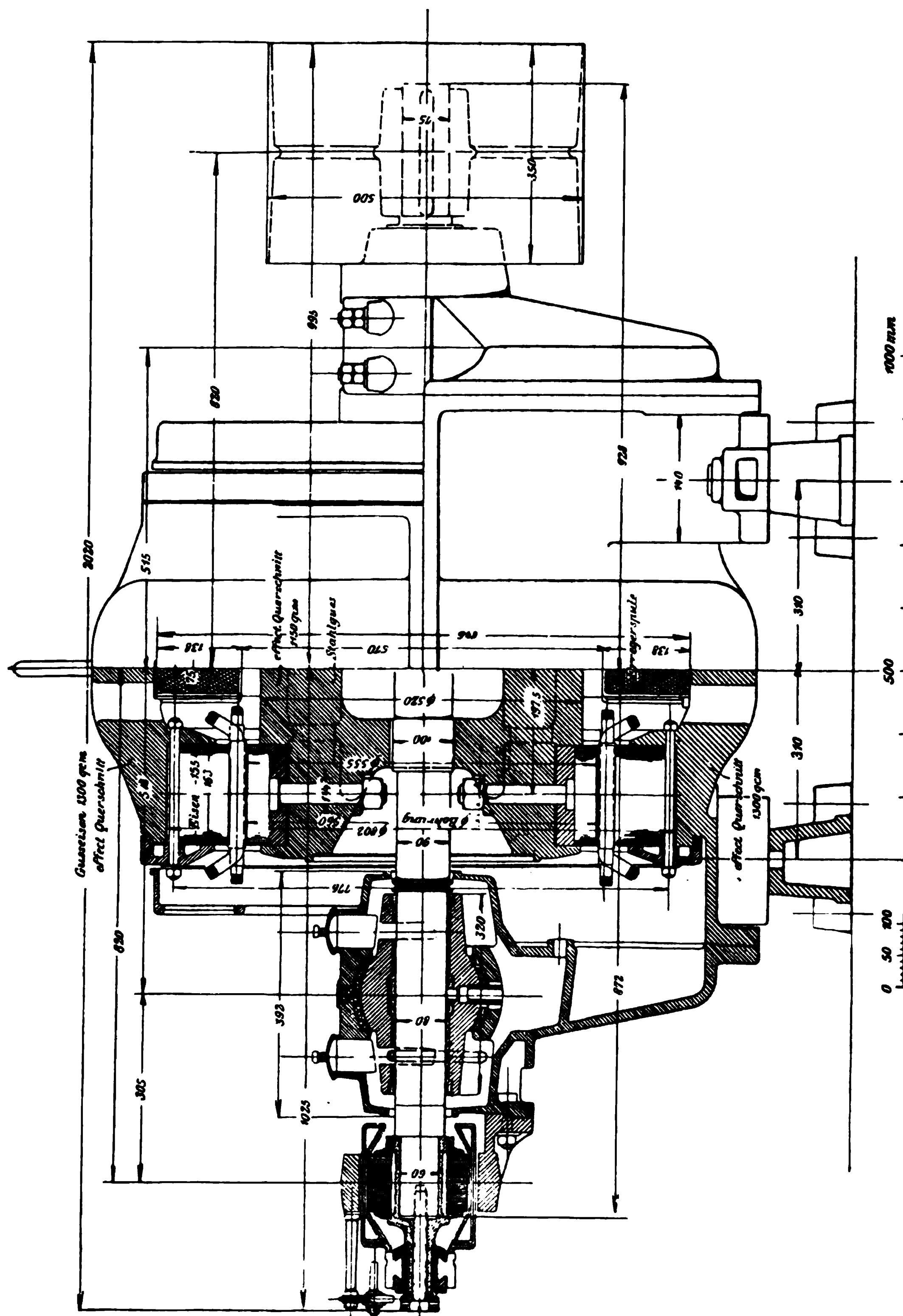

2020
995
820
928
515
305
393
1025
872
Stahlguss
0 50 100 500 1000 mm

Fig. 525.

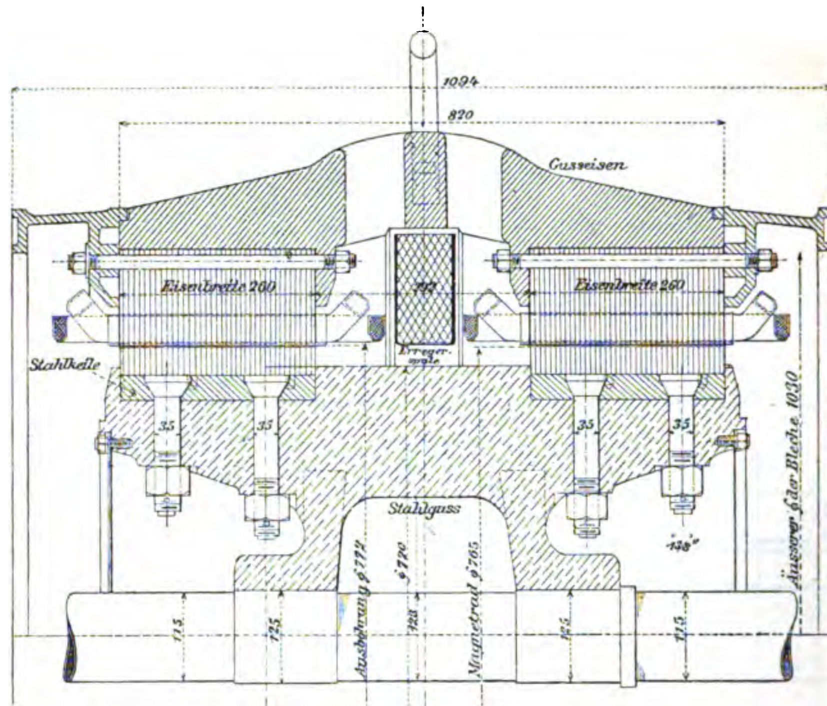


Fig. 526.

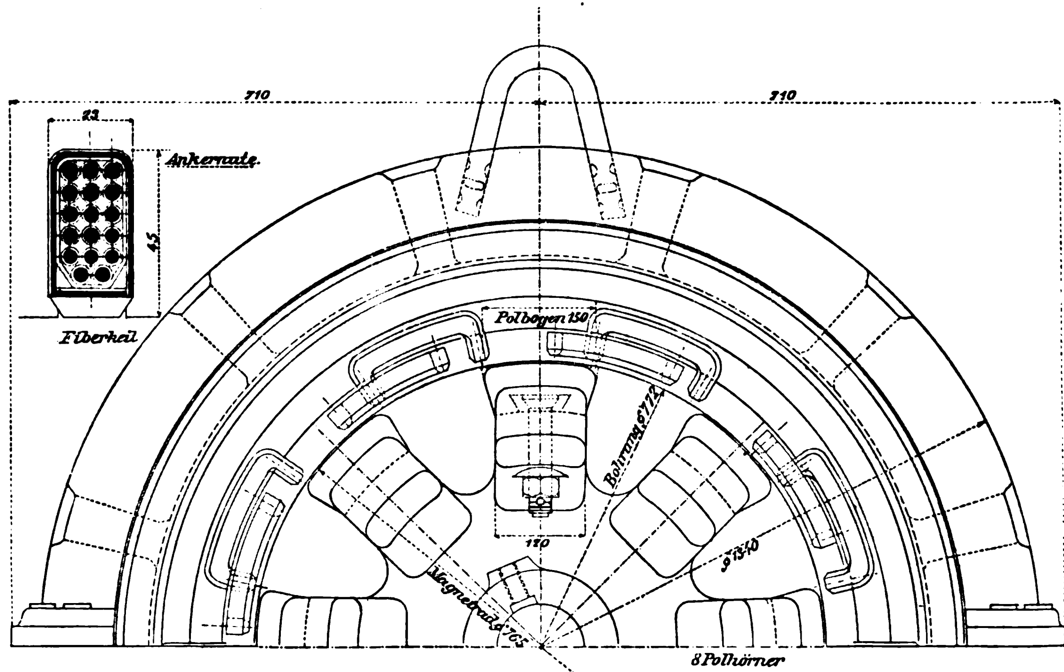


Fig. 527.

fällig (durch Blitzentladung oder mechanische Verletzung) beschädigten Spule kann daher in wenigen Minuten erfolgen. Die Nuten sind mit starken Glimmereinlagen, welche der Form der Nuten genau angepasst sind, ausgekleidet und auf diese Weise mit dem besten bekannten Isolator gegen das Eisengestell isoliert. Sämtliche stromführende Wicklungen und Klemmen sind gegen zufällige Berührungen durch Schutzverschalungen geschützt.



Fig. 528.

Jede Maschine besitzt zwei Nutenreihen, demnach zwei Gruppen von Spulen, welche in zwei parallelen Ringen am feststehenden Gehäuse untergebracht sind. Die beiden Ringe sind aus dünnen, von einander isolierten Eisenblechen zusammengesetzt, in das Gehäuse eingepresst und mit demselben durch Stahlbolzen fest verschraubt. — Zwischen den beiden, die Armaturwicklung tragenden Ringen, sitzt eine einzige, kreisrunde Erregerspule, in

welcher niedrig gespannter Gleichstrom von ca. 40 Volt Spannung zirkuliert. Diese Spule ist aus einem speciellen, mechanisch sehr widerstandsfähigen und ausgezeichnet isolierenden Material, dem Isolit, hergestellt und in Zirkularnuten des Umfanges festgelagert. Der Erregerstrom selbst wird in einer kleinen Erregerdynamo, deren Anker direkt auf die Hauptwelle aufgeschoben ist, erzeugt und durch feste Kohlenkontakte abgenommen.

Die Lagerung des rotierenden Teiles ist mit besonderer Sorgfalt durchgeführt. Die Lager sind mit automatischer Ölringschmierung versehen und



Fig. 531.

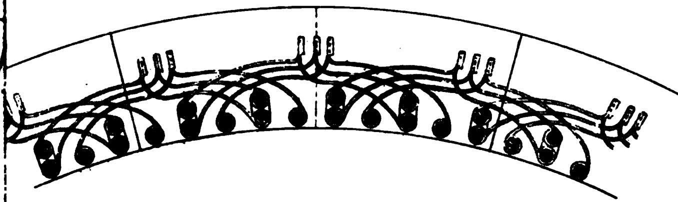
sind überdies als Kugellager nach amerikanischem System ausgebildet, so dass eine Klemmung der Wellenzapfen und ein Heisslaufen derselben vollständig ausgeschlossen ist. Die Lagerschalen sind sehr lang und werden mit Weissmetall ausgegossen, welches nach dem Eingiessen in der fertigen Schale unter hydraulischem Druck gepresst wird. Die Wellen sind aus naturhartem Tiegelgussstahl hergestellt. Bei den normalen Maschinen werden die Lagersterne abgedreht und in das Gussgehäuse centrisch eingepasst, wodurch eine genaue Centrierung zwischen den Lagern und dem Armaturgehäuse gesichert ist.

12 Segmente am Umfang

Blechsegment. Maasstab 1:5

ø 1950

2200



Ankernute des Erregers
Maasstab 2:1

530.

KOLBEN & Co PRAG. VYSOČAN 1899.

Ausbohrung ø 1950

448

640

2500

3000

Die Fig. 526 u. 527 entspricht einem einphasigen Induktorgenerator von 120 *PS*, 750 Touren, 2000 Volt, 100 Perioden. Eine Ankernute ist getrennt gezeichnet.

Die Maschine Fig. 525 leistet 50 *PS* bei 630 Touren (42 Perioden); $E = 190$ Volt, Luft 2,5 mm, $P : \tau = \sim 1$, $B_{Luft} = \sim 10000$, Umfangsgeschwindigkeit ca. 18 m, $B_{Ständer} = \sim 10500$. Der Kurzschlussstrom ist über das Vierfache des normalen; Stromdichte im Anker ca. 3, im Feld ca. 1,7.

Für grössere Leistungen verwendet KOLBEN die Wechselpoltype mit rotierendem Polstern (Fig. 528 ff.), und zwar sind entweder alle Pole oder nur jeder andere bewickelt. Das Gewicht dieser Type ist geringer und die Bauart des Ankers einfacher als bei der Gleichpoltype. Bei der Ausführung

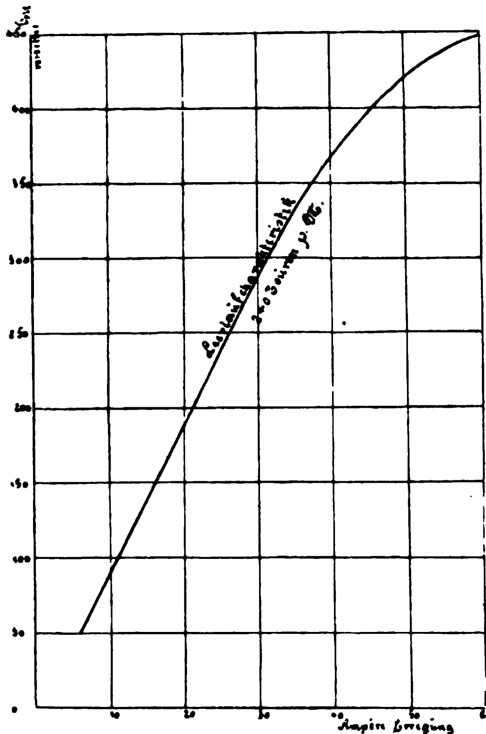


Fig. 532.

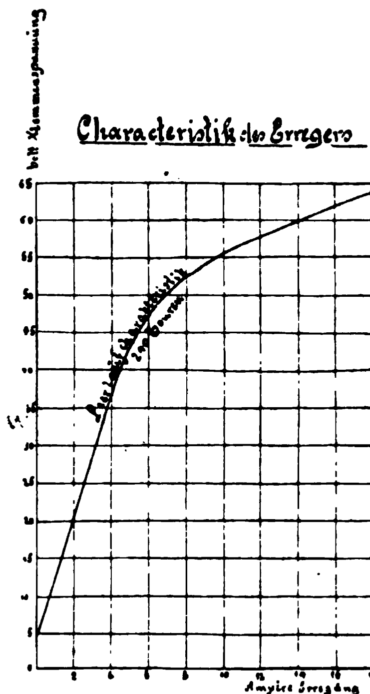


Fig. 533.

Fig. 528 ist das rotierende Magnetrad aus einem Stahlgussstück hergestellt, bei welchem jeder zweite Pol einen kreisrunden Querschnitt besitzt und die Magnetspulen trägt. Dieselben sind auf den Stahlkörper fest aufgepresst und durch die Polschuhe gegen die Centrifugalkraft geschützt. Die Wicklung der Spulen hat nur wenige Lagen, bei grossen Maschinen nur eine.

Der zwölfpolige Drehstromgenerator Fig. 528 leistet bei 500 Touren und 50 Perioden 90 Kilovoltampère. Die Stabwicklung ist eine Art Fasswicklung.

Der 20 polige Drehstromgenerator Fig. 529—531 ist für 400 Volt, 250 Kilovoltampère bei 40 Perioden und 240 Touren bestimmt. Die Ankernuten sind abwechselnd verschieden und enthalten zwei Stäbe und einen. Die Verbindung an den Stirnseiten geschieht durch V-förmige Bügel (Seitenwicklung). Die Pole aus Stahl sind in runde Löcher eines Stahlrades ein-

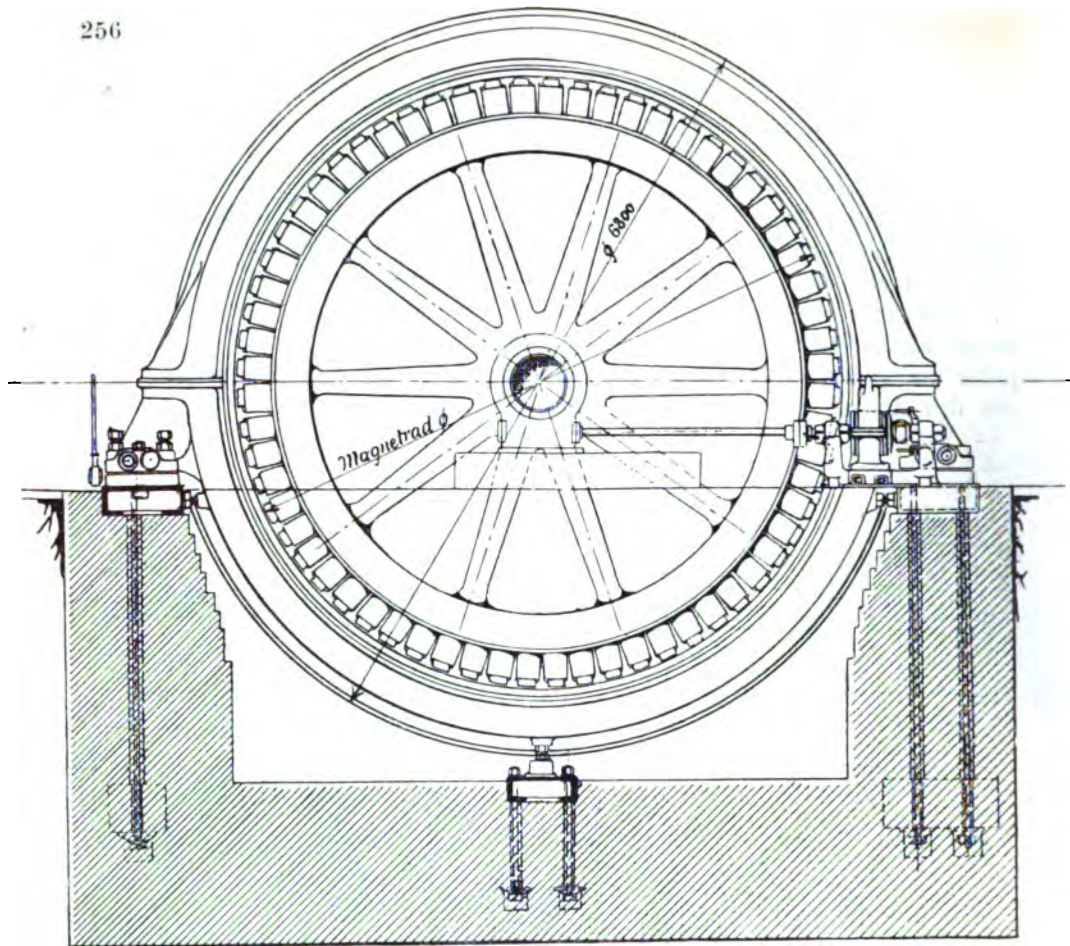


Fig. 537.

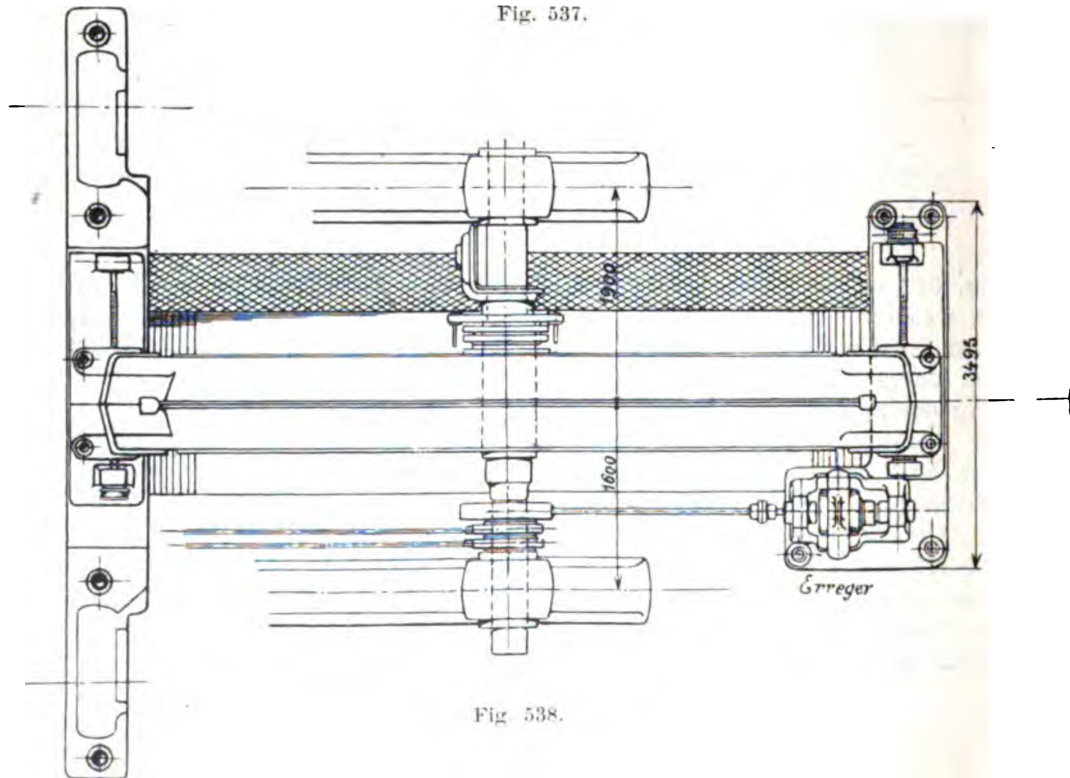
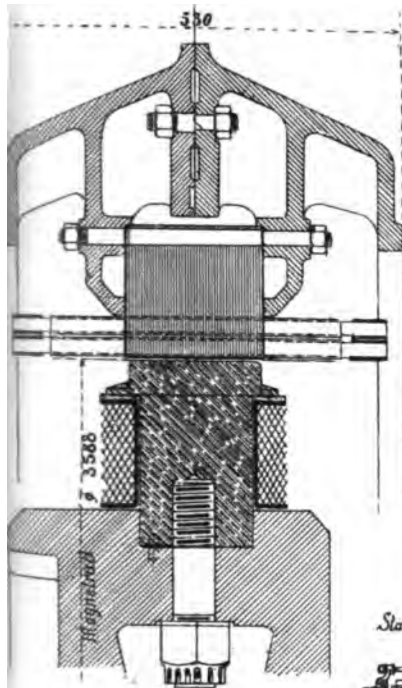


Fig. 538.

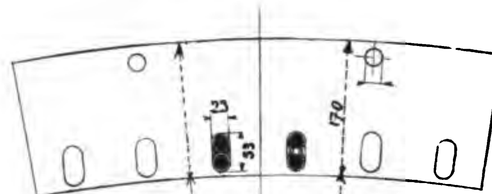
dem-Dampfmaschine



Armatur-Querschnitt

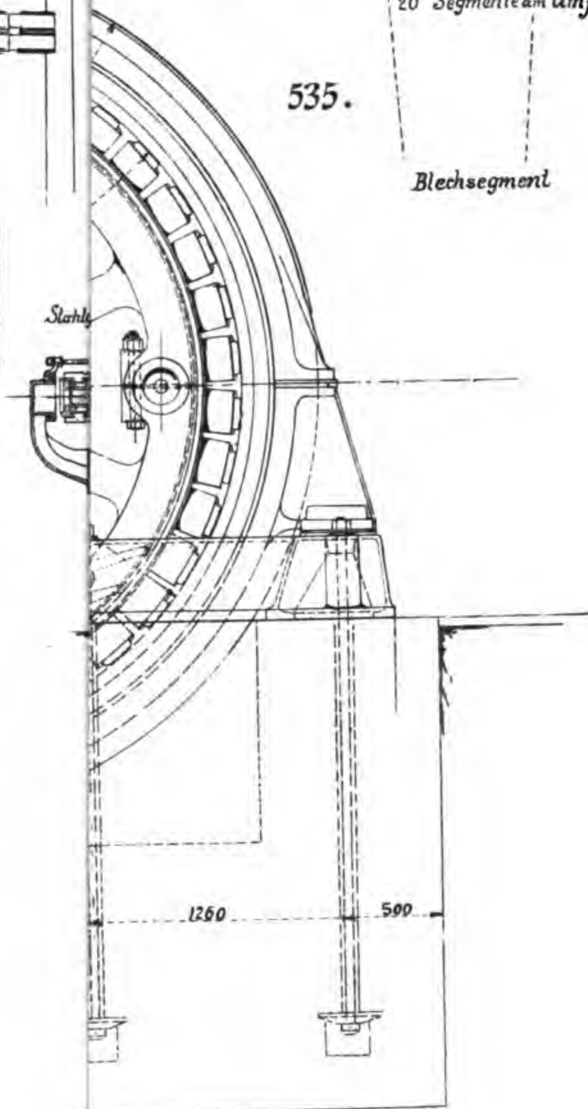


Ankernute des Erregers



535.

Blechsegment



Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

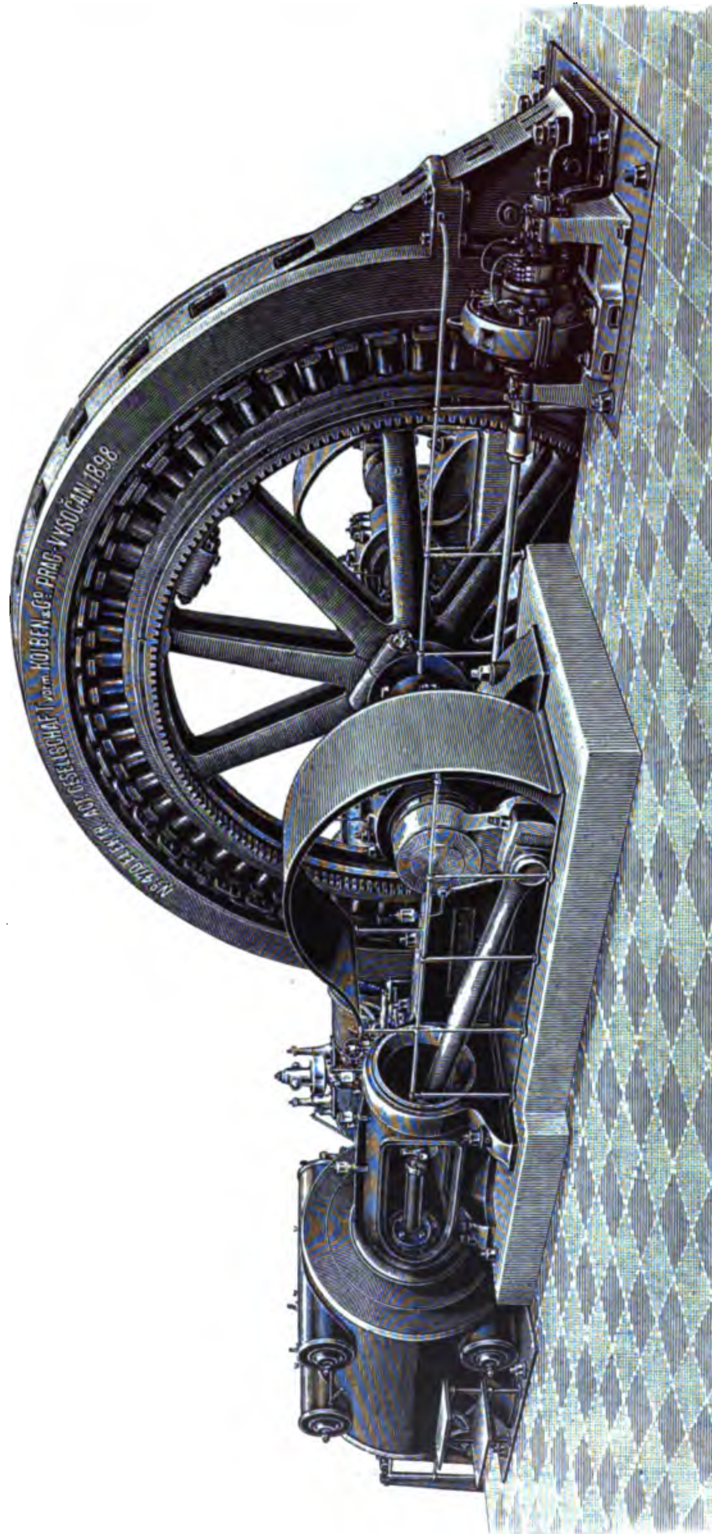


Fig. 539.

gelassen und angeschraubt. An der direkt gekuppelten Erregermaschine ist auf die Konstruktion der Bürstenbrille hinzuweisen. Die Leerlaufcharakteristik dieser Maschine zeigt Fig. 532 und diejenige ihres Erregers Fig. 533.



Fig. 540.

Die Dreiphasen-Schwungrad-Dynamo Fig. 534—536 nimmt 400 *PS* bei 120 Touren und 40 Perioden auf. Sie giebt 200/110 Volt Spannung und trägt Fasswicklung mit einer Nute pro Pol und Phase und zwei runden Stäben pro

Nute. Die Maschine ist für ihren Durchmesser sehr schmal, was die geringe Tourenzahl nötig macht.

Von der 1000 *PS*-Drehstrommaschine Fig. 537—541 sind interessante

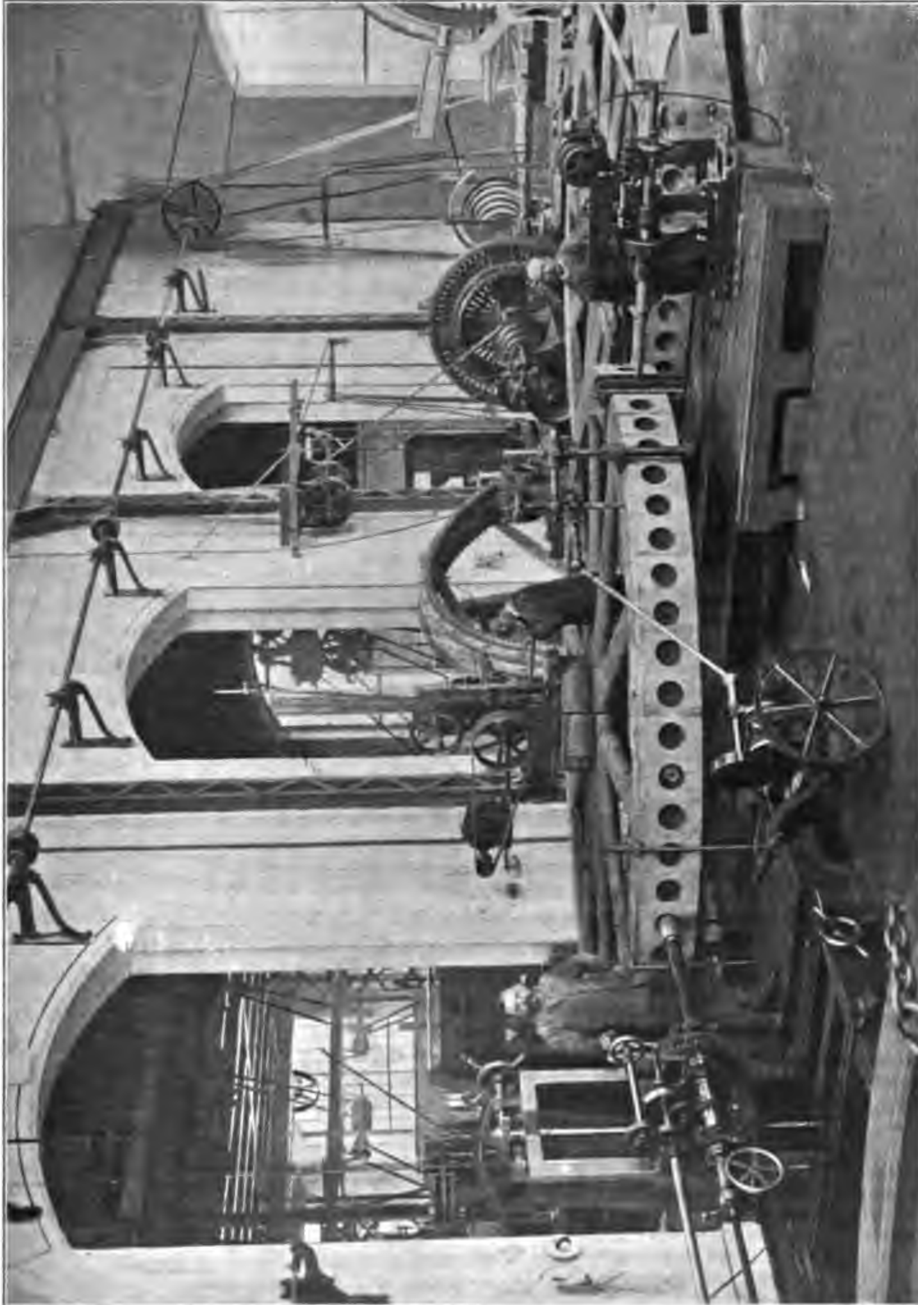


Fig. 541.

Einzelheiten gegeben. Fig. 541 zeigt das in Bearbeitung befindliche Magnetrad. Die Löcher, in welche die Pole eingesetzt werden, sind an dem Rade deutlich erkenntlich. In Fig. 540 wird das Gehäuse zusammengesetzt,

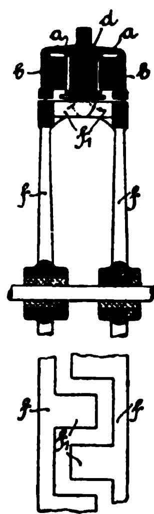


Fig. 542.

das wie bei allen schon erwähnten Generatoren aus zwei Gusshälften zusammengeschraubt wird. Das Gehäuse kann durch Spindeln über das Magnetrad weggeschoben werden, um Reparaturen vornehmen zu können. Der Antrieb der Erregermaschine ist insofern von Interesse als er durch Schnecke und Schneckenrad von der Generatorwelle aus erfolgt. Die Tourenzahl des Erregers wird damit wesentlich erhöht und diese kleine Maschine verbraucht nur wenig Raum.

§ 240. Pichler. Wechselstromerzeuger von F. Pichler, Weiz bei Graz, D. R.-P. Nr. 103 275: In dem einen Teil des magnetischen Stromkreises Fig. 542 bildenden Gehäuse *a* sind die Erregerspulen *b* und der mit Trommelwicklung versehene Induktor *d* befestigt. Vor ihnen drehen sich die beiden Magneträder *f*, die mit ihren Polvorsprüngen f_1 entgegengesetzter Polarität zahnartig ineinander greifen. Die Pfeile geben den Verlauf der magnetischen Kraftlinien an.

65. Wechselstrommaschinen schweizer Firmen.

§ 241. Alioth. Die Elektricitäts-Gesellschaft Alioth-Münchenstein liefert seit vielen Jahren Innenpolmaschinen der Wechselpoltype mit gemeinsamer grosser Erregerspule, von denen in Fig. 543 u. 544 ein typisches Bild gegeben ist. Die Maschine nimmt bei 350 Touren 340 *PS* auf: Das Magnetsystem besteht aus einem auf der Achse befestigten radförmigen Ring, an dem zwei andere Ringe aus Stahlguss angeschraubt sind. Diese letzteren tragen je neun Polhörner, die gegeneinander versetzt, die Erregerspule umfassen. Zu beiden Seiten des Magnetsystems befindet sich je ein Schleifring, der mit den Enden der Erregerwicklung verbunden ist. Die beiden Lager sind mit Ringschmierung versehen und tragen je einen Bürstenbolzen, dessen Bürste auf dem zugehörigen Schleifring aufliegt. Beide Lager sind mit dem Anker auf einer gemeinsamen Grundplatte montiert, die von dem Erdboden durch Porzellanklötze isoliert ist. An dem einen Lager ist das zweipolige Magnetsystem der Erregermaschine befestigt, dessen zugehöriger Trommelanker auf dem hervorstehenden Ende der Welle sitzt. Das andere Wellenende dient zur Aufnahme einer Kupplungshälfte.

Drehzahl des Magnetfeldes pro Minute . . .	350	
Wechselzahl pro Sekunde	105	
Klemmenspannung	4200	Volt
Stromstärke	54	Ampère
Wirkungsgrad bei voller Last	90	Proc.
Anker:		
Innerer Durchmesser der Bleche (Bohrung) . .	1670	mm
Äusserer Durchmesser der Bleche	2000	„
Länge des Kernes in der Richtung der Achse .	350	„
Länge des Eisens allein in der Richtung der Achse	280	„
Zahl der Nuten	18	
Tiefe der Nuten	70	„
Breite der Nuten	70	„
Breite der Zahnkrone	222	„

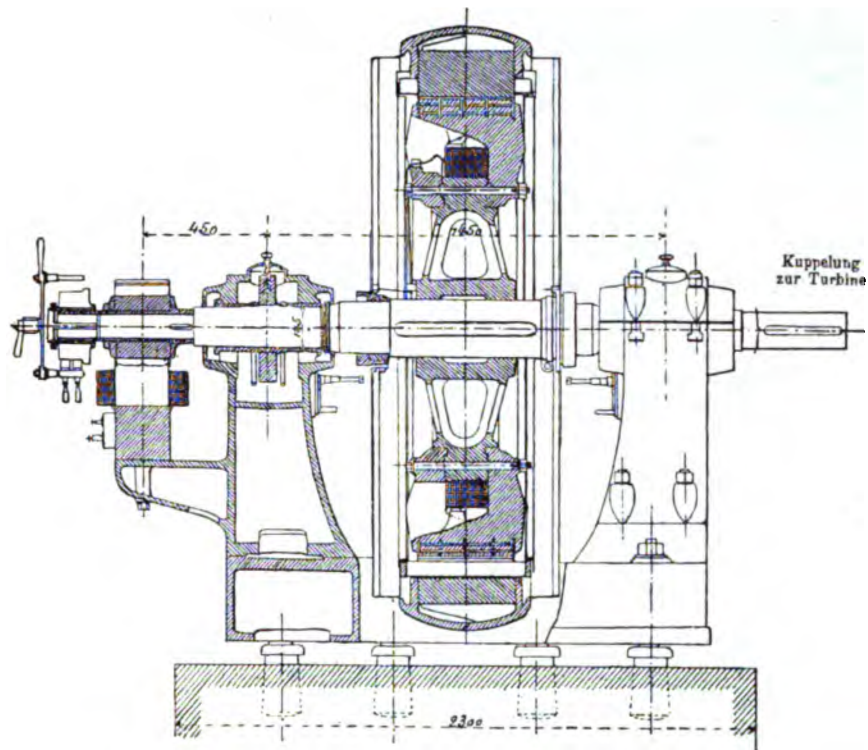


Fig. 543.

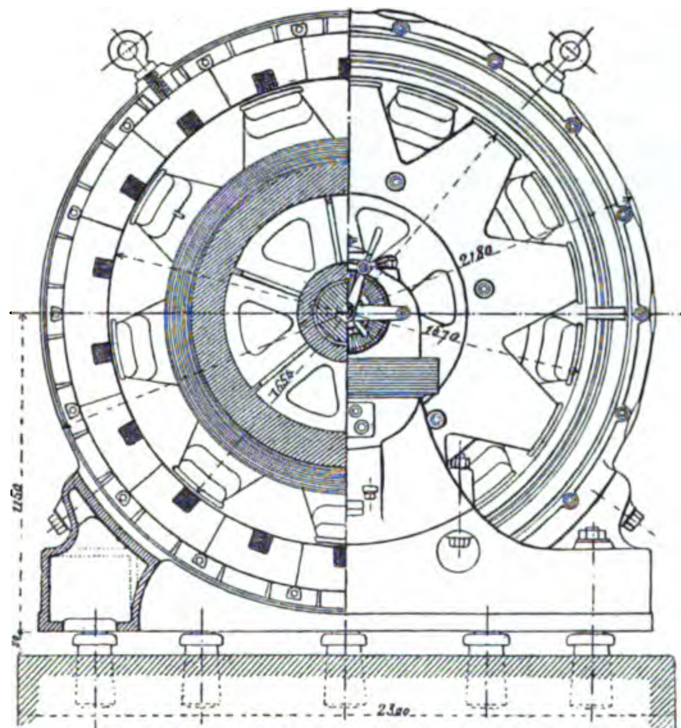


Fig. 544.

Der Ankerkern ist aus Holzkohlenblechen von 0,5 mm Stärke aufgebaut, die untereinander durch Papier isoliert sind, so dass die Ausnutzung circa 80 Proc. beträgt. In jeder der 18 Nuten liegen 120 Leiter, von denen je 60 zu einer Spule gehören. Jede Spule umfasst nur einen Zahn. Die Spulen sind in 2 parallele Gruppen à 9 Spulen in Serie geschaltet, so dass die Spannung zwischen 2 Spulen in allen Nuten gleichmässig nur 467 Volt beträgt. Jede Spule ist mit Band umwunden und dann mit Schelllack getränkt.

Ankerwicklung:

Zahl der Ankerspulen	18	
„ „ Windungen einer Spule	60	
„ „ „ hintereinander	540	
Länge einer mittleren Ankerwindung	1,45	m
Durchmesser des Ankerdrahtes blank	3,5	mm
„ „ „ isoliert . . .	4,5	„
Widerstand der Ankerwicklung bei 50° C. . .	1,58	Ω

Magnetsystem:

Zahl der Pole	18	
Länge der Polfläche in der Richtung der Achse	350	mm
Breite der Polfläche in peripherer Richtung (Polbogen)	230	„
Äusserer Durchmesser des Magnetsystems . .	1654	„
Verhältnis des von den Polen umfassten Teils zum ganzen Ankerumfang	0,8	
Mass eines Polhorns an der Wurzel, peripher .	350	„
„ „ „ „ „ „ achsial .	110	„
Äusserer Durchmesser des Jochringes	560	„
Innerer „ „ „	440	„

Die Erregerspule enthält 525 Windungen Kupferdraht von 4,5 mm Durchmesser blank und 5,5 mm Durchmesser isoliert. Ihr Widerstand ist bei 50° C. ca. 2,4 Ω. Sie erhält ihren Strom durch Schleifringe von der angekuppelten zweipoligen Erregermaschine, die 70 Volt bei 35 Ampère erzeugt (Zschr. f. E. u. M.).

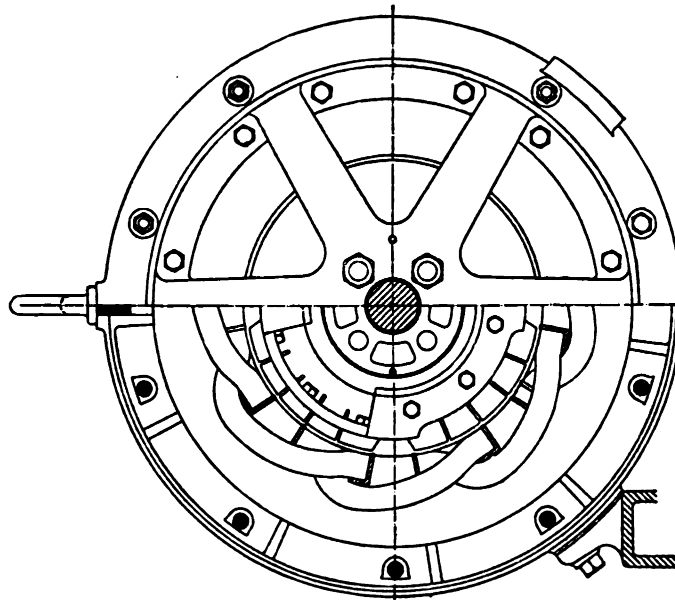
Die Verluste und die abkühlenden Oberflächen sind:

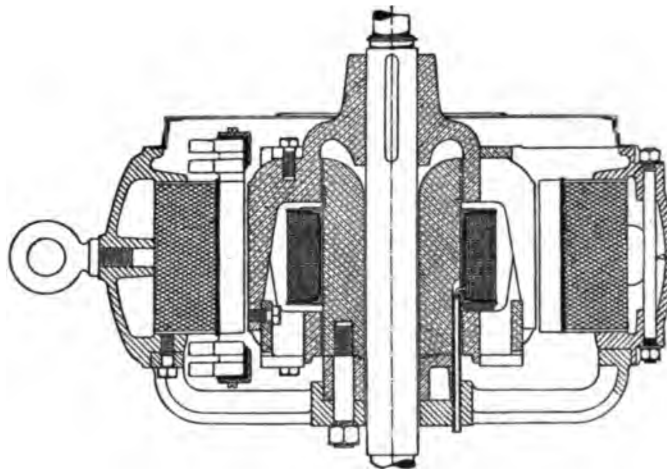
Stromwärme im Ankerkupfer $54^2 \cdot 1{,}58 =$	4620	Watt
Kernverluste, Hysteresis und Wirbelströme ca.	6050	„
	10670	Watt
Abkühlende Oberfläche des Ankers	37300	qcm
Watt pro 1 qcm Ankeroberfläche	0,288	
Stromwärme in der Feldspule $\frac{70^2}{2{,}4}$	2040	Watt
Abkühlende Oberfläche der Spule	= 7034	qcm
Watt pro 1 qcm Spulenoberfläche	0,290	

In der Centrale von Neuchâtel ist eine derartige Maschine aufgestellt, deren rotierender Induktor leicht austauschbar ist, sodass in der Maschine bei gleicher Tourenzahl dreiphasig 33 Perioden oder einphasig 50 Perioden erzeugt werden können. In einem Falle sind es 12 Pole, im andern 18.

Die Maschine Fig. 545 u. 546 ist insofern interessant als die Erregerspule feststeht und nur die Pole rotieren. Es ist diese Anordnung durch Schaffung eines zweiten Luftzwischenraumes von 1 mm möglich gemacht.

Die einzelnen Pole sind durch Bronzestücke untereinander verschraubt. Die Maschine ist zweiphasig für 2000 Volt. Neuerdings ging die Firma ALIOTH zu der Gleichpoltype (Fig. 547) über. Die beiden Polräder sind um eine halbe Teilung versetzt und die Anker durchgewickelt. Die Erregerspule hängt mittelst Spindeln an dem Gehäuse.


Fig. 546.


Fig. 545.

§ 242. Brown, Boveri & Co.

Die Firma **Brown, Boveri & Co.** Baden verwendet in den meisten ihrer Anlagen eine Cykelzahl von 40 bis 45 oder weniger bei Tourenzahlen bis 28 pro Minute herunter. Für geringe Leistungen etwa bis 100 PS führt sie bei Spannungen bis 1000 Volt die Aussenpoltype Fig. 548 mit Joch aus Gusseisen und Polen aus Flusseisen und rotierendem Anker mit ganz oder teilweise geschlossenen Nuten aus. Zwischen 100 und 500 PS ist die Induktoranordnung Fig. 549[1]) gebräuchlich, die wohl von BROWN zuerst ausgeführt

---

1) Nach dem „Hilfsbuch für Elektrotechnik".

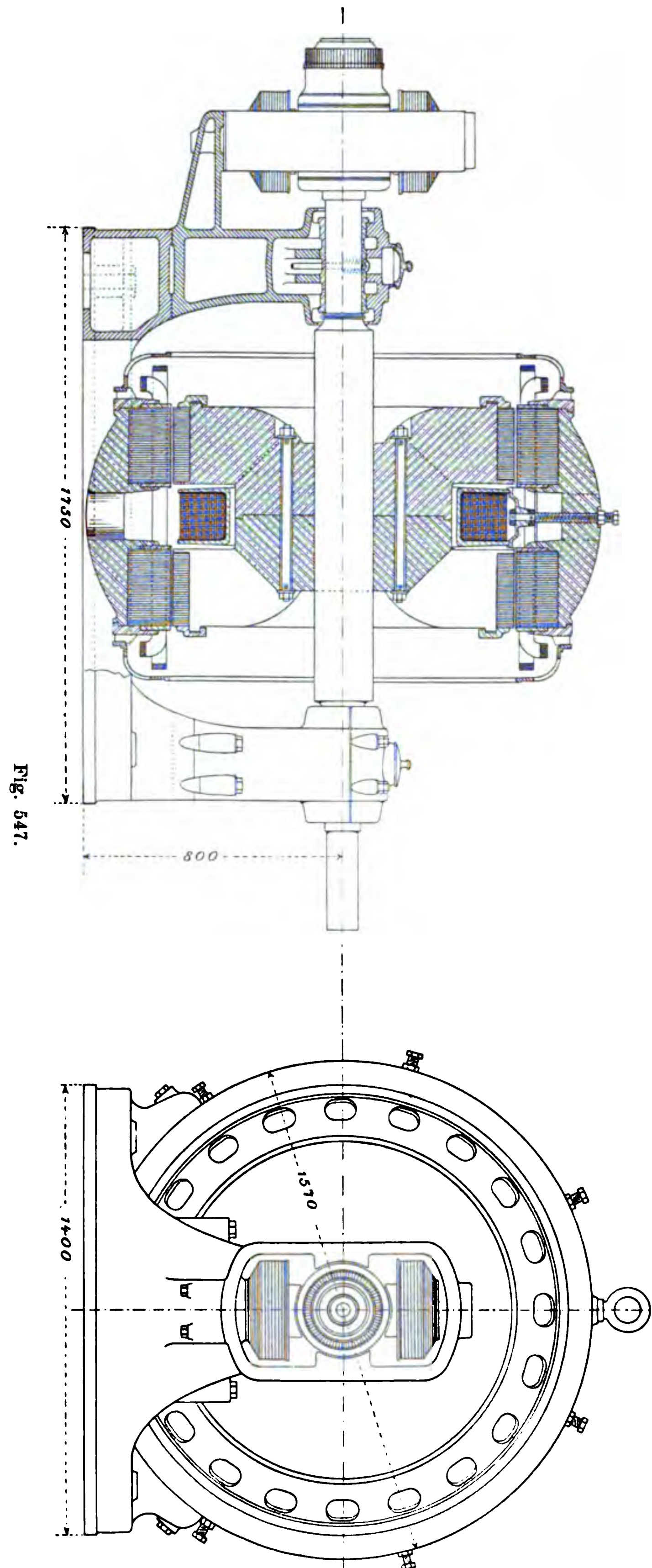
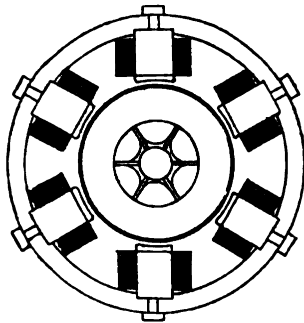


Fig. 547.



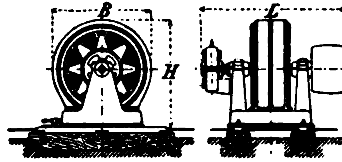


Fig. 549.

wurde. Jeder zweite Pol ist aus Stahl angegossen, dazwischen ist ein runder Pol, der die Erregerwicklung trägt, aufgeschraubt. Die Nuten sind meist durch einen ganz dünnen Steg ganz geschlossen. Bei Stabwicklung wird meist Fasswicklung angewendet.

Für hohe Umlaufszahlen benützt Brown die Induktortype, die er jedenfalls als einer der ersten industriell einführte, und zwar mit durchgehender Wicklung in beiden Ankern, also mit versetzten Polhörnern. Diese Type macht z. B. bei 900 PS ca. 1300 Umdrehungen, bei 900 PS ca. 500 Touren und eignet sich für direkte Kupplung mit Turbinen hohen Gefälles.

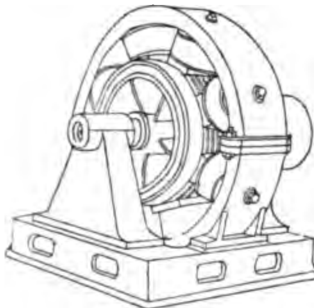


Fig. 548.

Alle grossen Modelle sind mit rotierendem Polrad ausgerüstet, dessen Pole sämtlich bewickelt sind. Die Stahlpole (Fig. 550—552) sind aufgeschraubt, das Rad selbst kann aus Gusseisen oder Stahl bestehen. Der Erregerwickelraum ist radial niedrig gehalten — es ist eine Lage hochkant gewickeltes Kupfer 3 × 32 — und es ist möglichst runder Polquerschnitt angestrebt. Die Pol-

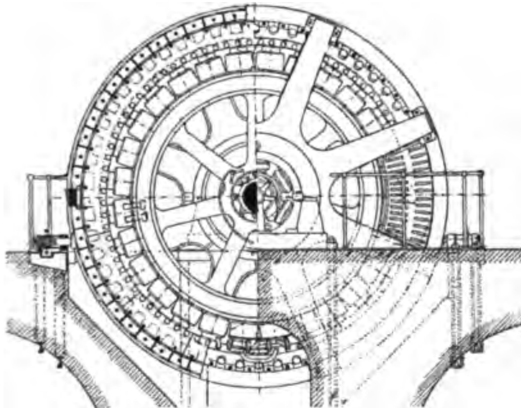


Fig. 550.

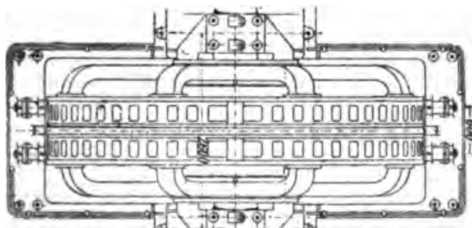


Fig. 552.

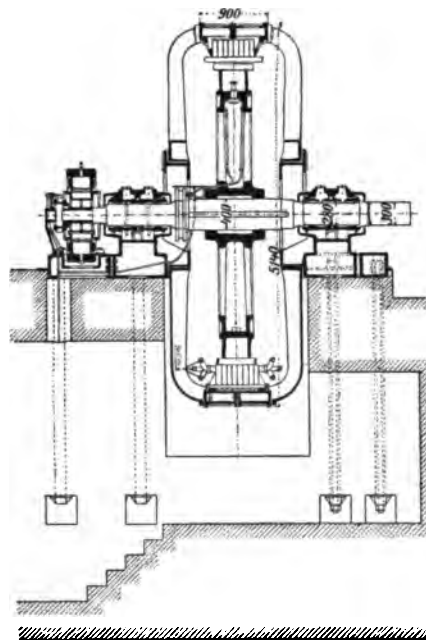


Fig. 551.

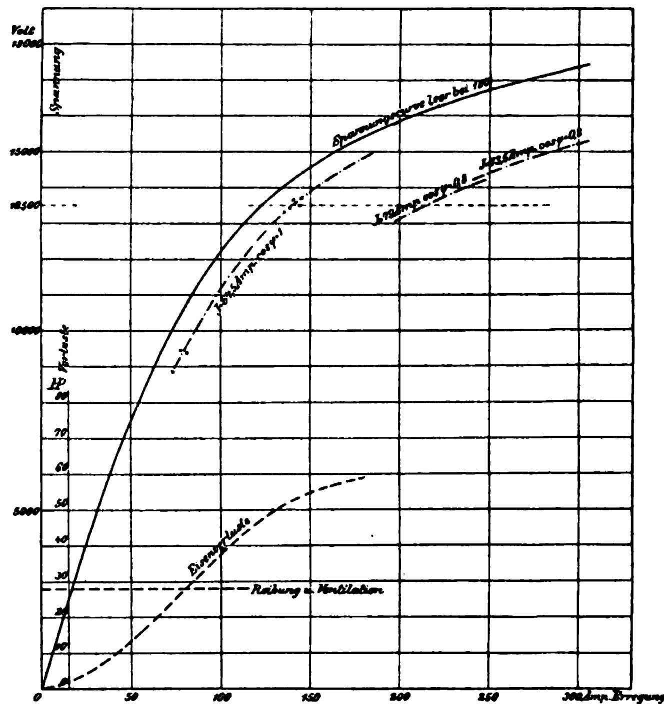


Fig. 553.

schuhe sind geblättert. Das Gehäuse wird durch zwei Armsterne auf Ansätzen der Lagerböcke abgestützt und ist darauf drehbar angeordnet, um Spulen bequem erneuern zu können. Die Nuten sind für die Maschine Fig. 550 u. 551 rund und mit starken Isolationshülsen ausgefüttert. Die

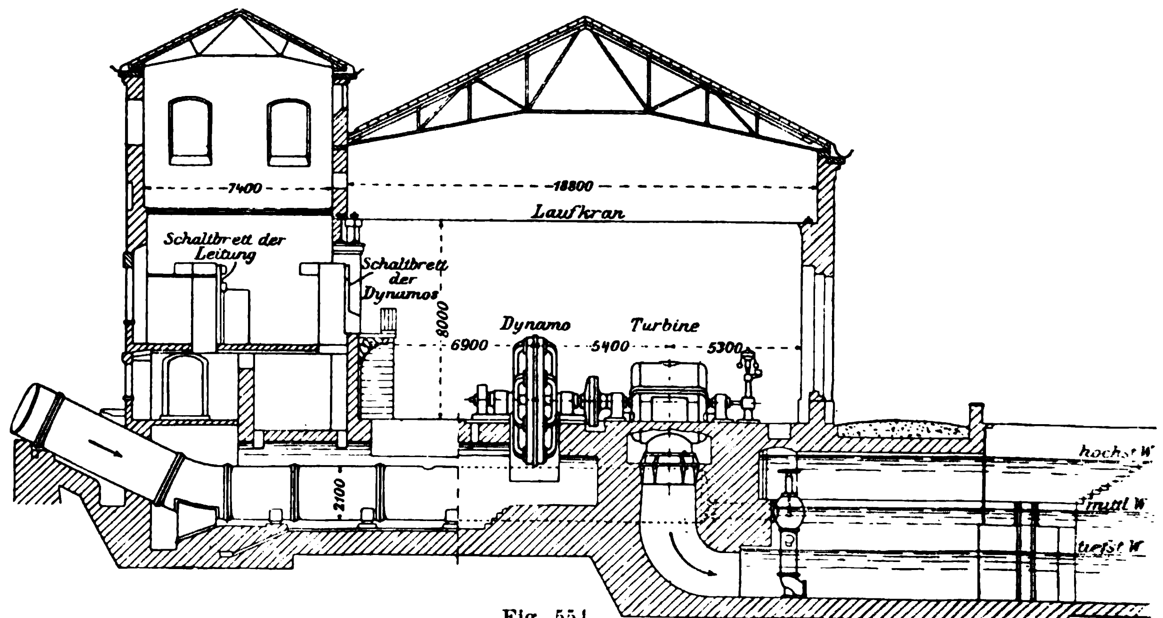


Fig. 554.

Ankerwicklung ist luftig in drei Abteilungen ausgeführt. Vier horizontale Schraubenbolzen, welche in entsprechenden Lagerungen der Fundationsplatte drehbar sind, dienen dazu, das Armaturgehäuse seitlich festzuhalten.

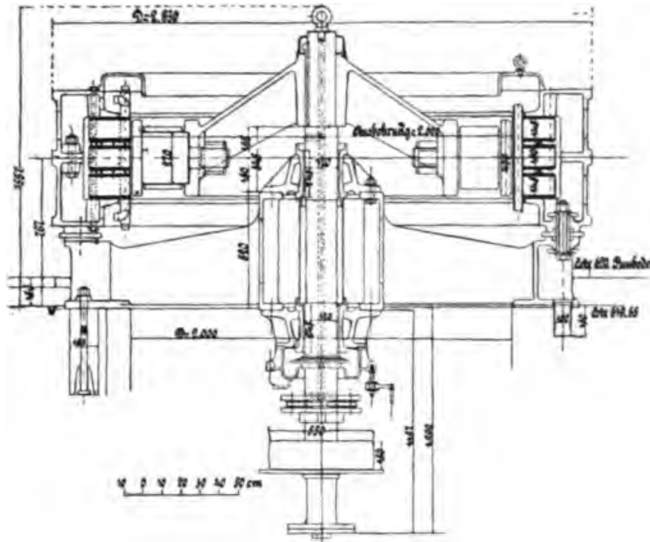


Fig. 555.

Diese Dynamo (Paderno) macht 180 Touren und erzeugt 13 500 Volt bei 42 Perioden. Das Polrad hat einen Durchmesser von 4,1 m, also eine Umfangsgeschwindigkeit von 38 m, die sogar auf 63 m gesteigert wurde.

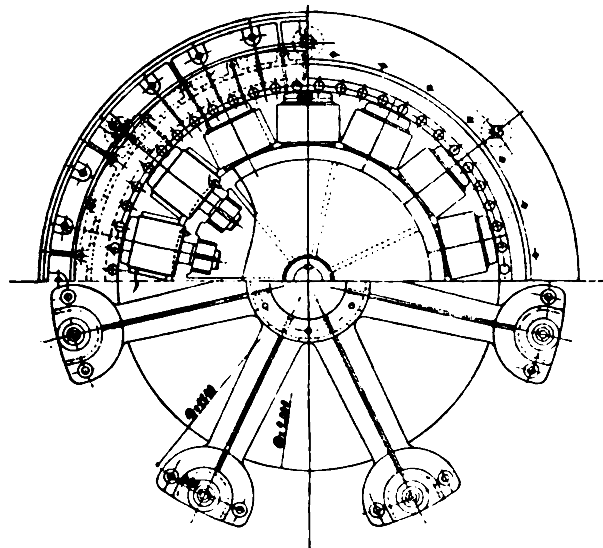


Fig. 556.

Der Generator ist durch eine elastische Zodelkupplung mit einer Turbine verbunden. Der sechspolige Erreger von 38 KW mit Serientrommel sitzt direkt auf der Hauptachse. Die Charakteristik dieser Maschine von 2160 PS

ist in Fig. 553 niedergelegt. Der Spannungsabfall bei cos $\varphi = 1$ und 64,5 Ampère pro Phase (dreiphasig) beträgt 5 Proc., bei cos $\varphi = 0,8$ und 79 Ampère 16,4 Proc. Der Wirkungsgrad ist bei 64,5 Ampère, 13 500 Volt,

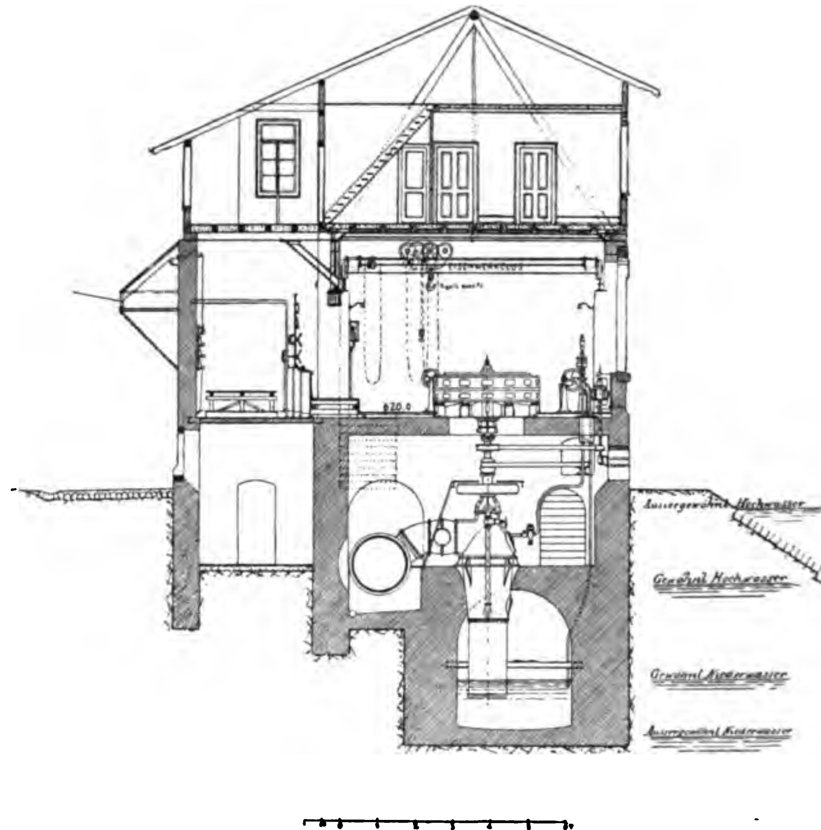


Fig. 557.

cos $\varphi = 1$ ca. 95 Proc. und $93^1/_2$ Proc. bei 79 Ampère, 13 500 Volt cos $\varphi = 0,8$ und zwar samt Erregerdynamo. Das Ankereisen, das durch zahlreiche

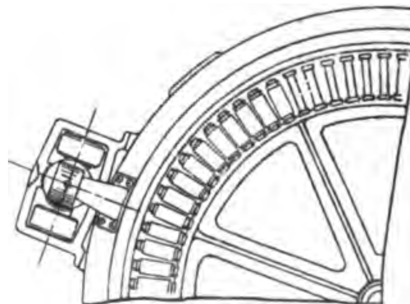


Fig. 558.

Ventilationskanäle durchsetzt ist, erwärmt sich bei Dauerbetrieb um ca. 28^0, das Ankerkupfer um ca. 15^0. Ein Bild der Gesamtmaschinenanlage in Paderno giebt Fig. 554.

Der Zweiphasengenerator (Sihlwerk) Fig. 555 u. 556 sitzt auf der vertikalen Turbinenwelle und nimmt bei 360 Touren pro Phase ca. 400 PS bei 5000 bis 5500 Volt auf. Die Erregermaschine wird von der Hauptwelle

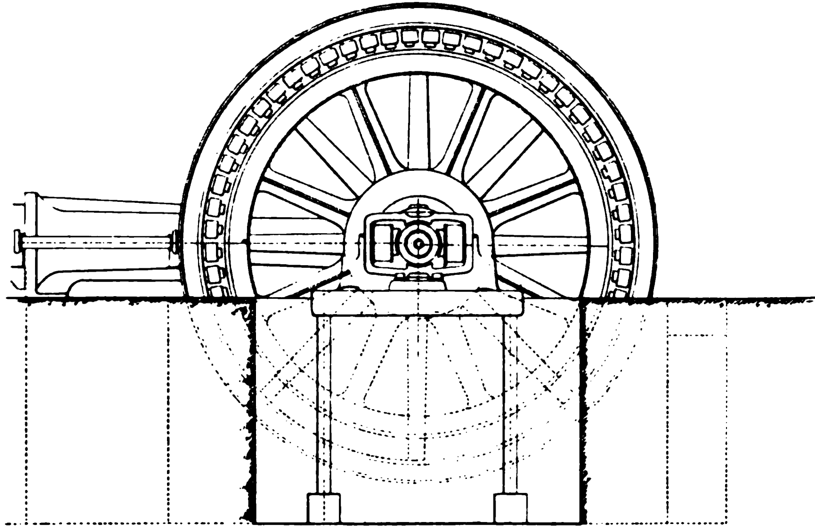


Fig. 559.

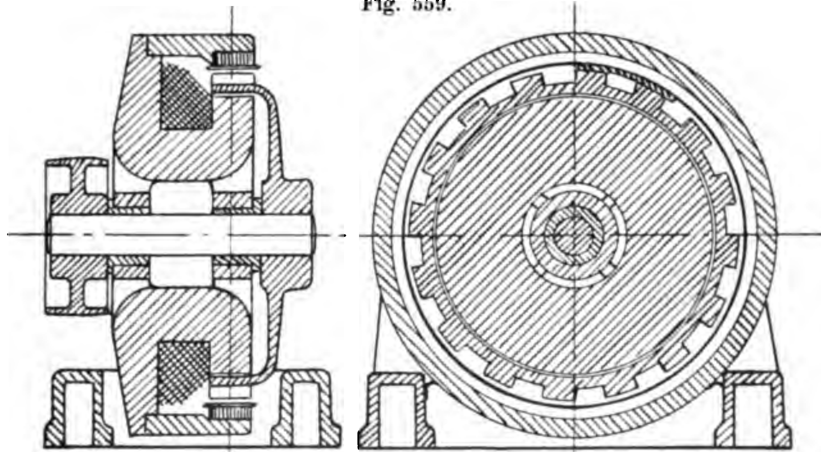


Fig. 560.

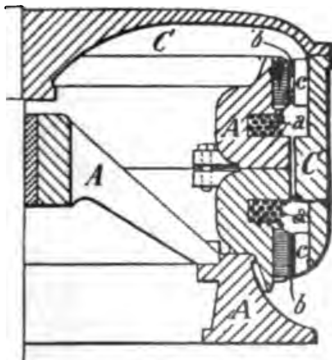


Fig. 561.

mittels Kameelhaarriemen angetrieben und steht ebenfalls vertikal. Der ganze Antrieb ist aus Fig. 557 zu ersehen. Auf der vertikalen Welle sitzt ein sehr kräftiges Schwungrad.

Bei geringer Tourenzahl der Turbine muss die Dynamo bei direkter Kupplung mit sehr viel Polen versehen werden (Fig. 558, Rathhausen). Die Erregerdynamo sitzt direkt daneben.

Für direkte Kupplung mit langsamlaufenden Dampfmaschinen entwarf Brown die originelle Aussenpolmaschine Fig. 559, wobei die am

Schwungrad befestigten Pole um die feststehende Armatur rotieren. Es ermöglicht diese Anordnung ein bequemeres Unterbringen der zahlreichen Pole und lässt namentlich an Erregerwickelraum gewinnen.



Fig. 562.

§ 243. Cie. de l'Ind. él. Genf. Die Anordnung der Wechselstromglockentype — Gleichpoltype — der Cie. de l'Industrie électrique Genf (Thury) entspricht der Fig. 560. Dieses Modell ist nur einankrig, gleicht jedoch im übrigen der mehrfach

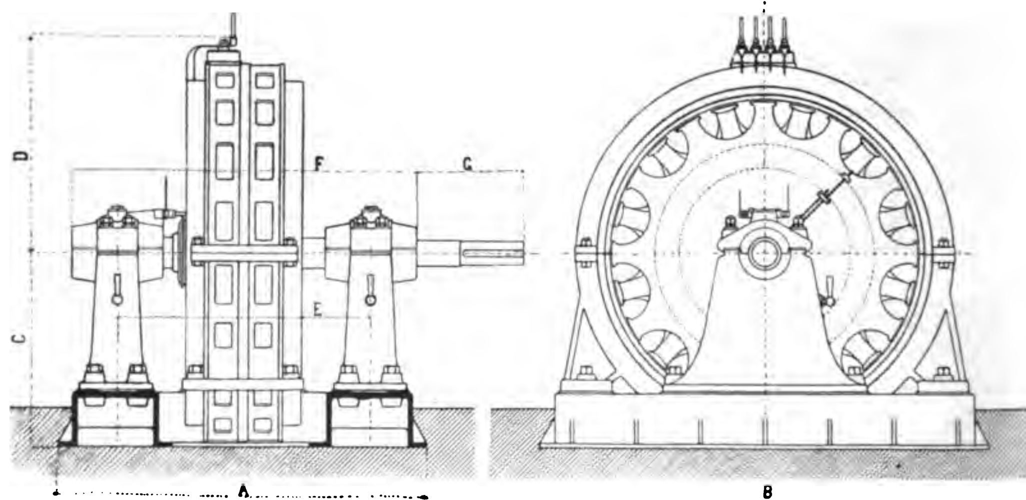


Fig. 563.

behandelten Induktortype. Für vertikale Wellen hat diese Type das Aussehen Fig. 561. Es rotiert hierbei die äussere Glocke *C*. Diese Maschine ist doppelankrig. Die Thury-Alternatoren haben Umfangsgeschwindigkeiten bis 100 m pro Sekunde. Der Induktorgenerator Fig. 562 ist für Nieder-

spannung, nämlich für elektrolytische Zwecke bestimmt. Die induzierte Wicklung besteht deshalb aus Kupferbarren, die durch starke Schienen parallel geschaltet werden.

Die Maschinenfabrik Oerlikon bei Zürich war eine der ersten Firmen, die den Bau von Drehstrommaschinen aufnahmen. Die schon Ende § 244. Oerlikon.

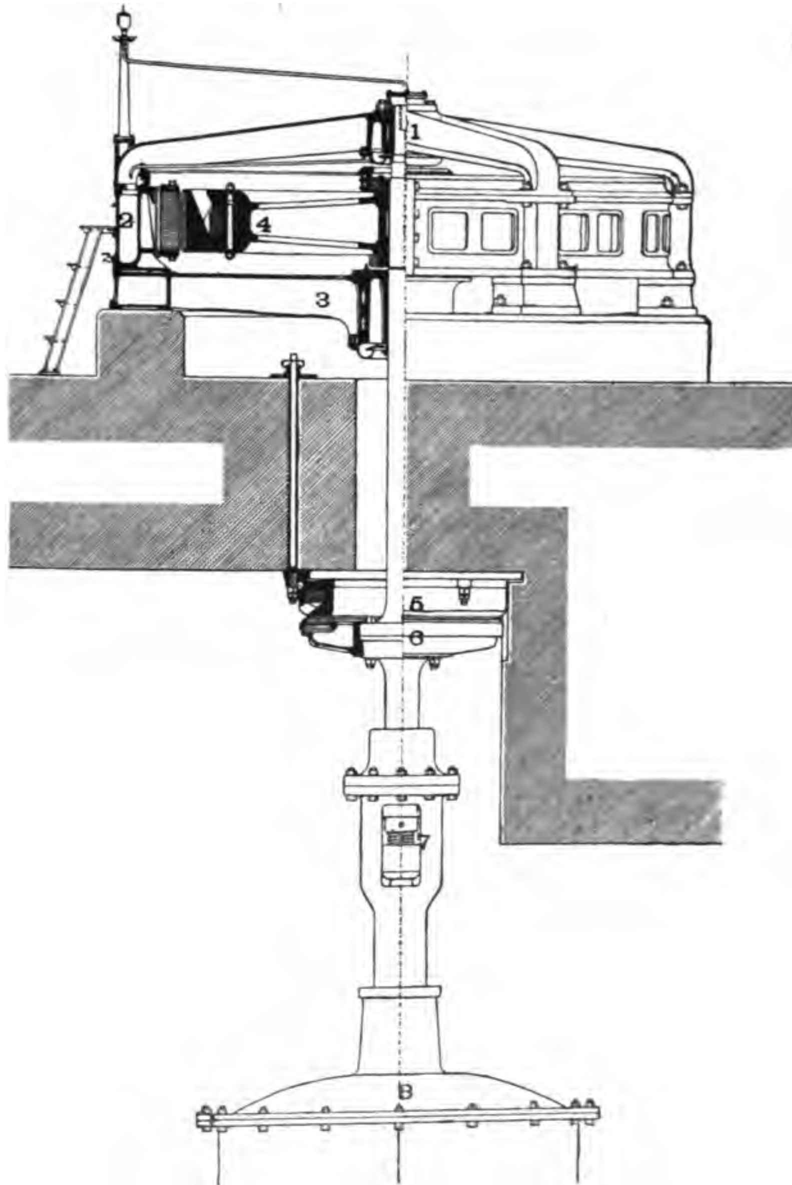


Fig. 564.

der achtziger Jahre gebaute Type, welche auch die berühmte Kraftübertragung Lauffen-Frankfurt speiste, entspricht der Skizze Fig. 563. Sie ist von C. E. Brown entworfen. In Fig. 564 ist dieses Modell direkt auf eine vertikale Turbinenwelle gesteckt. Die Spurzapfen dieses Maschinenaggregates sind magnetisch entlastet. 5 ist ein durch eine gemeinsame Spule erregter

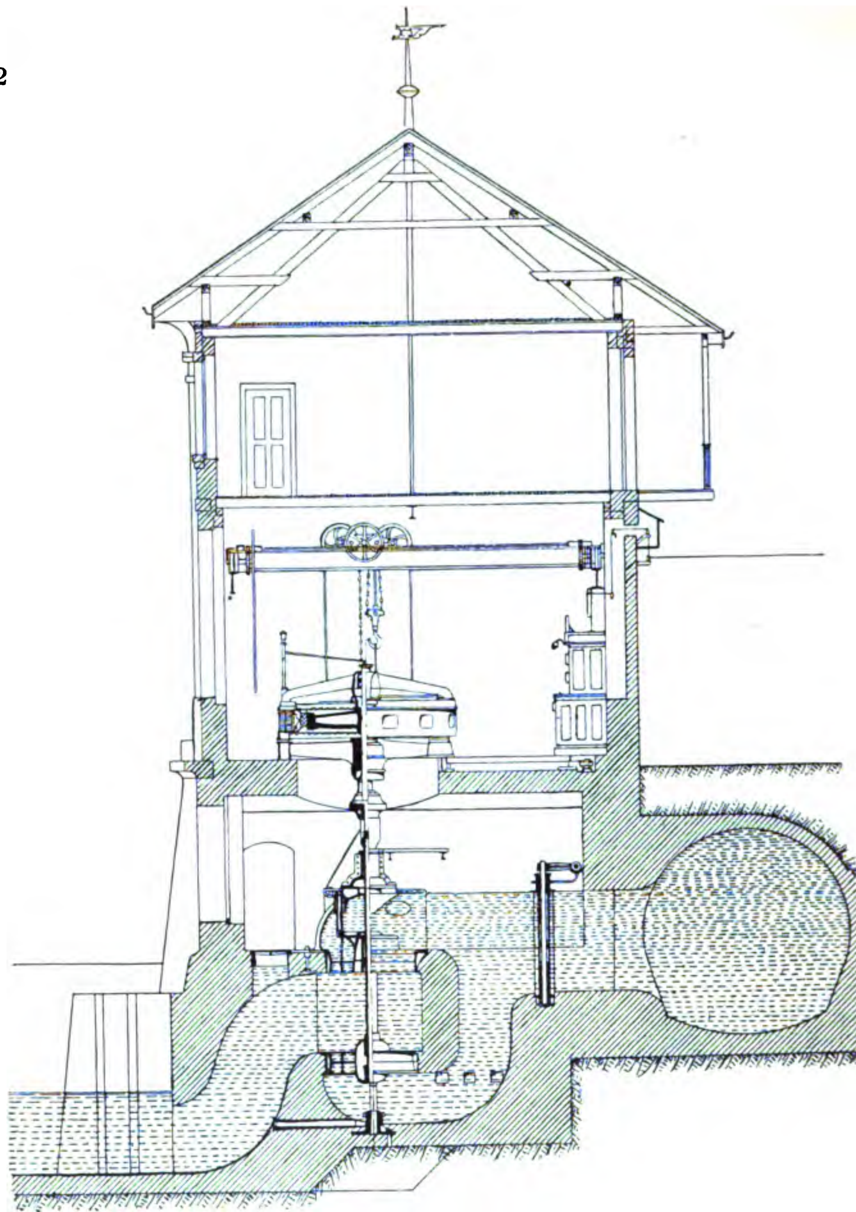


Fig. 565.

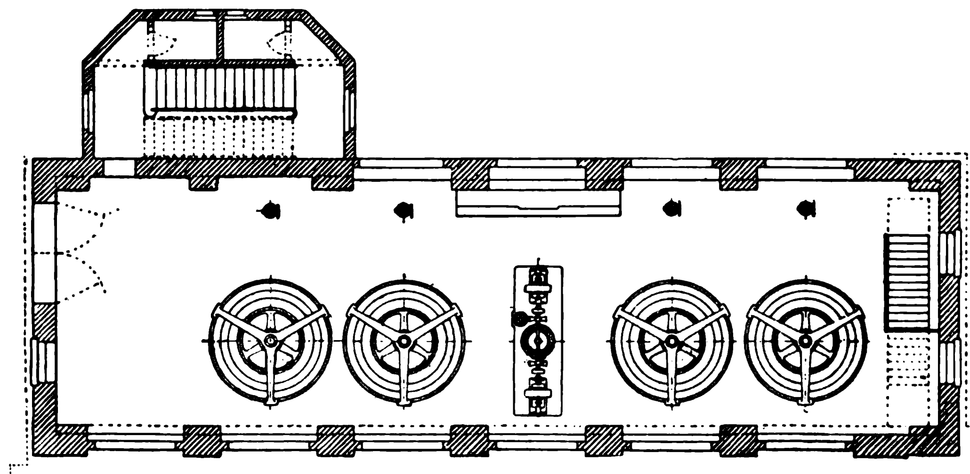


Fig. 566.

Entlastungsmagnet mit vielen Polen, vor denen ein geblätterter Anker 6 rotiert. Die Pole ziehen den Anker an und wirken damit der Wellenbelastung direkt entgegen. Der gesamte Einbau einer solchen Turbinendynamo ist in Fig. 565 u. 566 gegeben. — Neuen Datums ist die Gleichpoltype Fig. 567 für 300 PS, deren lamellierte Pole aufgeschraubt sind. —

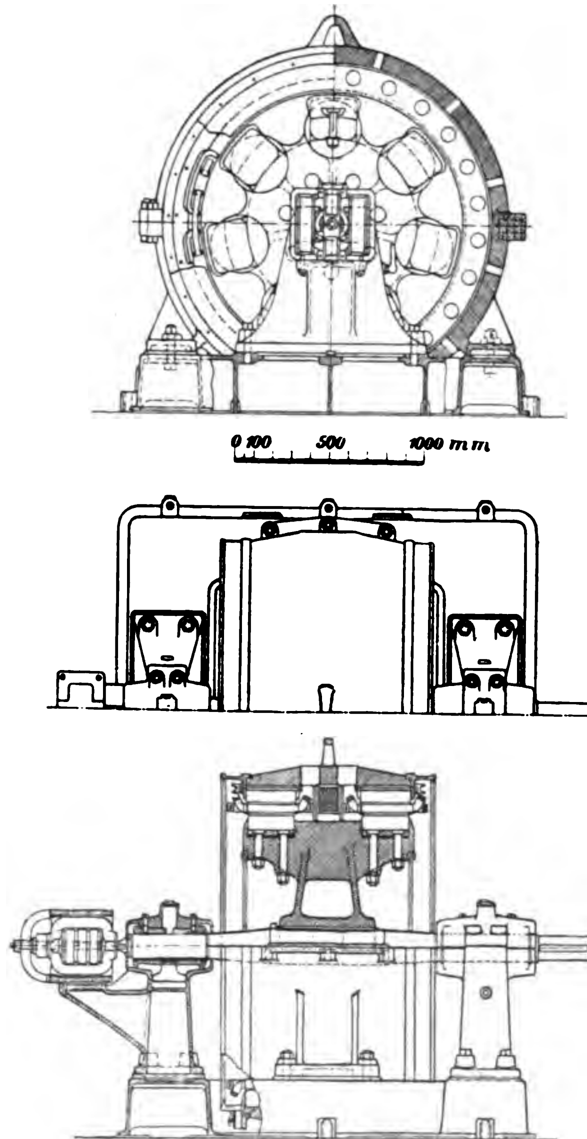


Fig. 567.

Die von Oerlikon für die grossen Kraftübertragungswerke Rheinfelden gelieferten Drehstromgeneratoren gehören ebenfalls der Induktortype (Fig. 568) an. Die normale Leistung dieser Maschine ist pro Phase 63 Ampère 3800 Volt, der gesamte Wirkungsgrad über 92 Proc., die Tourenzahl 55.

Im Prinzip bestehen diese Maschinen aus zwei ruhenden, durch das Gehäuse mechanisch und magnetisch miteinander verbundenen Ankerringen;

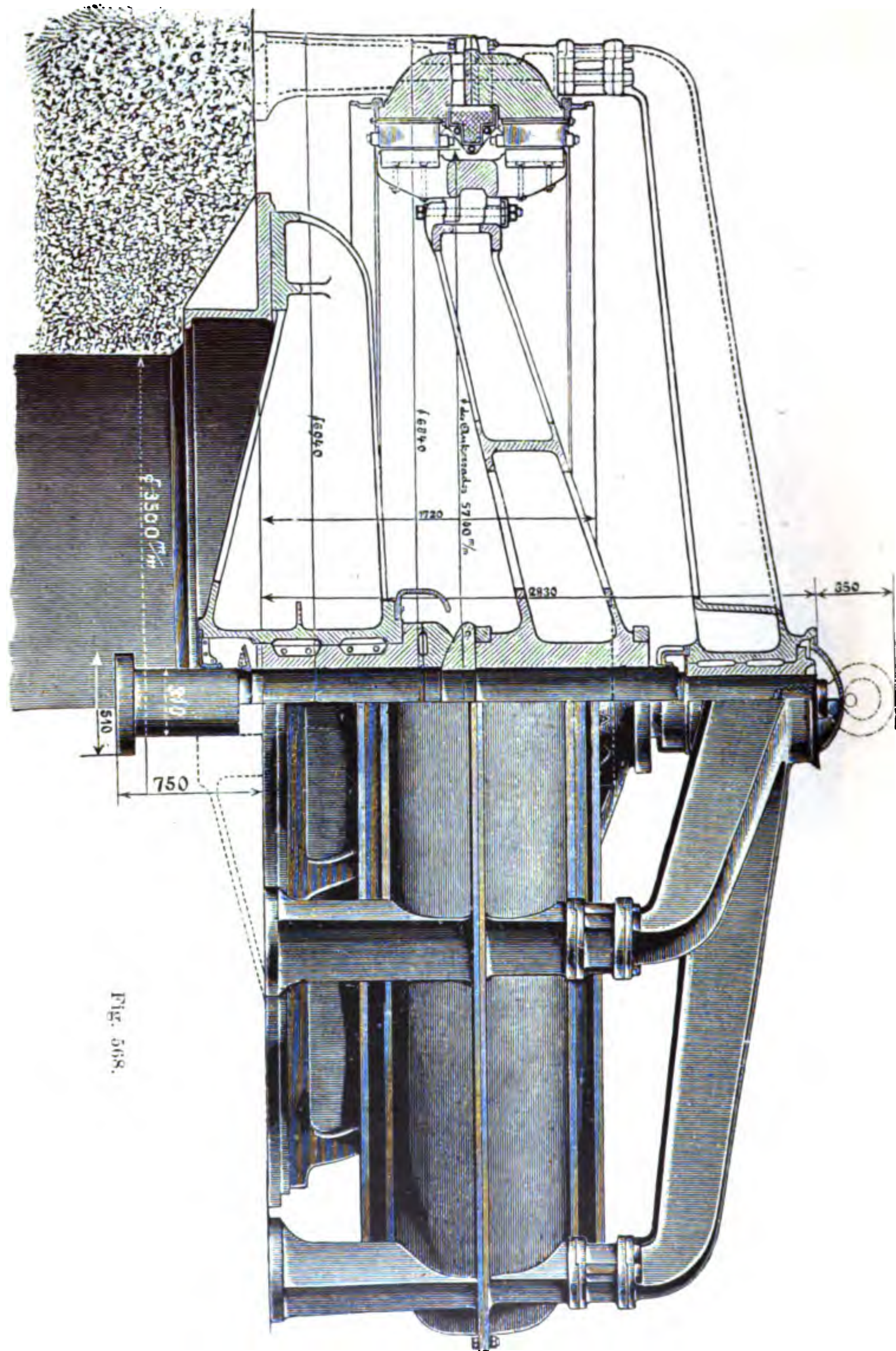


Fig. 568.



Fig. 569.



Fig. 570.

diese sind aus einzelnen gestanzten Eisenblechen zusammengesetzt und tragen auf hervorstehenden Zähnen die mit Mikanit isolierten Spulen, die in fertigem Zustande aufgeschoben werden. Das aus fünf Sektoren zusammengesetzte



Fig. 571.

und durch ein Armkreuz mit der Welle verbundene Induktorrad trägt am äusseren Umfange zahnartig 55 Joche, deren Enden aus dünnen Eisenblechen bestehen und die den magnetischen Kreislauf zwischen beiden Ankern so

schliessen, dass bei der Drehung des Polrades die Stellen höchster magnetischer Dichte an der Oberfläche der beiden Anker entlang wandern und so auf die Ankerspulen induzierend wirken. Die Welle wird in Lagern geführt, welche unterhalb und oberhalb der Maschine in den Naben starker gusseiserner Armkreuze angebracht sind.

Das ringförmige Dynamogehäuse von beinahe 7 m Durchmesser besteht aus vier Bogenstücken, die mit so hohen Füssen auf einem Tonnengewölbe



Fig. 572.

über den Turbinen ruhen, dass die Zugänglichkeit des Lagers unter dem Induktorrade auch im Betriebe gewahrt bleibt, ausserdem ist es horizontal in Hälften geteilt, die durch Schrauben am äusseren Umfange miteinander verbunden sind. Der C-förmige Querschnitt des Gehäuses umhüllt die zwischen den Polhörnerreihen unbeweglich eingebettete Erregerspule der Maschine derart, dass das Induktorrad bei Revisionen oder Reparaturen in der Achsenrichtung ungehindert nach oben hinausgezogen werden kann.

Die Teilung des Maschinengehäuses geschah wesentlich zur Erleichterung des Transportes. In magnetischer Hinsicht könnte sie vielleicht zu Bedenken

Anlass geben; aber die Erfahrung hat gelehrt, dass die durch eine derartige Teilung entstehenden Fugen im Eisen keinen nachteiligen Einfluss auf das Funktionieren der Maschine ausüben, zumal gerade bei dieser Maschinentype der Verlauf der magnetischen Kraftlinien hauptsächlich in radialer und achsialer Richtung und nur zum geringsten Teile parallel zur Bohrung erfolgt.

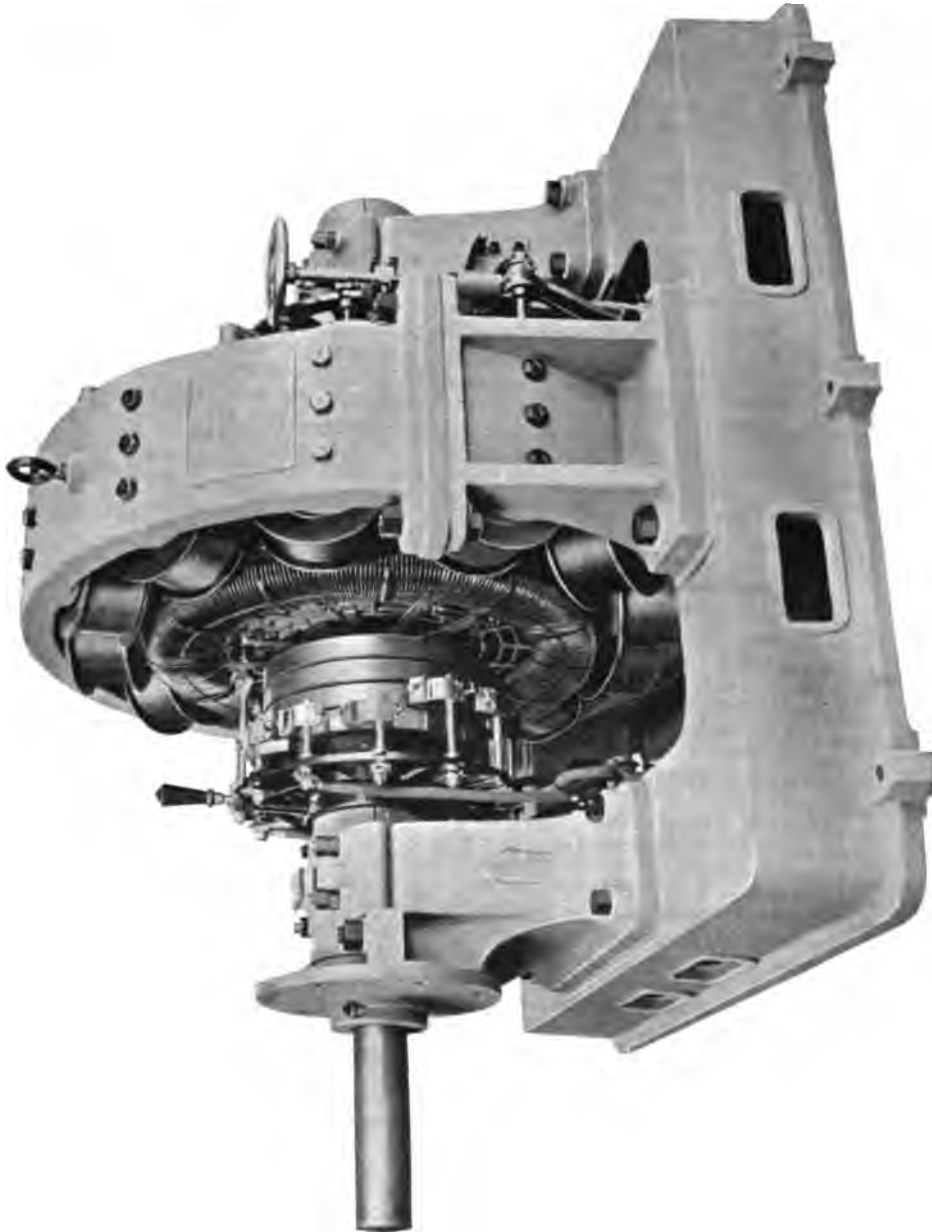


Fig. 573.

Das Drucklager im unteren Armkreuz hat das Gewicht der Welle, der Turbinenräder und des Induktorrades, kurz sämtlicher laufenden Teile zu tragen. Wenn nun auch bei voller Auflage der reibenden Flächen eine übermässige Beanspruchung nicht zu befürchten wäre, so verursacht die dabei auftretende Gleitgeschwindigkeit doch eine Reibungsarbeit von mehr als

100 PS, zu deren Verminderung Öldruckentlastung vorgesehen ist. Das Öl wird unter einem Druck zugeführt, der der Belastung das Gleichgewicht hält, und die Gleitflächen schweben deshalb fast gewichtslos übereinander. Das in feinem Strahl nach innen austretende Öl dient zur Schmierung des Lagers, während das nach aussen fliessende in einer ringförmigen Tropfrinne aufgefangen wird.

Um Streuungen der magnetischen Linien zu verhüten, die von der Welle durch die Lagerarmkreuze in das Gehäuse überzugehen streben, ist das Gehäuse vom oberen Kreuz durch Einlagen aus Bronze, das untere durch Befestigung der Füsse ausserhalb der Unterlagsplatte auf dem Zementboden magnetisch isoliert.

Die Ankerringe bestehen aus isolierten segmentförmigen Eisenblechen, die mit versetzten Fugen im Kreise herum und stumpf aneinanderstossend aufeinandergelegt sind. Mit ihrem Rücken stossen sie gegen die cylindrische



Fig. 574.

Wand des Gehäuses und sind nach oben und unten mit Messingplatten abgegrenzt.[1])

Die Fig. 569 bis 573 veranschaulichen eine Reihe neuerer Konstruktionen der Oerlikoner Werke:

Fig. 569 Gleichpoltype von 300 PS, 150 Touren, 1000 Volt mit verschiebbarem Gehäuse.

Fig. 570 Innenpol-Wechselpoltype von 1140 PS, 220 Touren, 7000 Volt.

Fig. 571 Gleichpoltype von 1300 PS, 75 Touren.

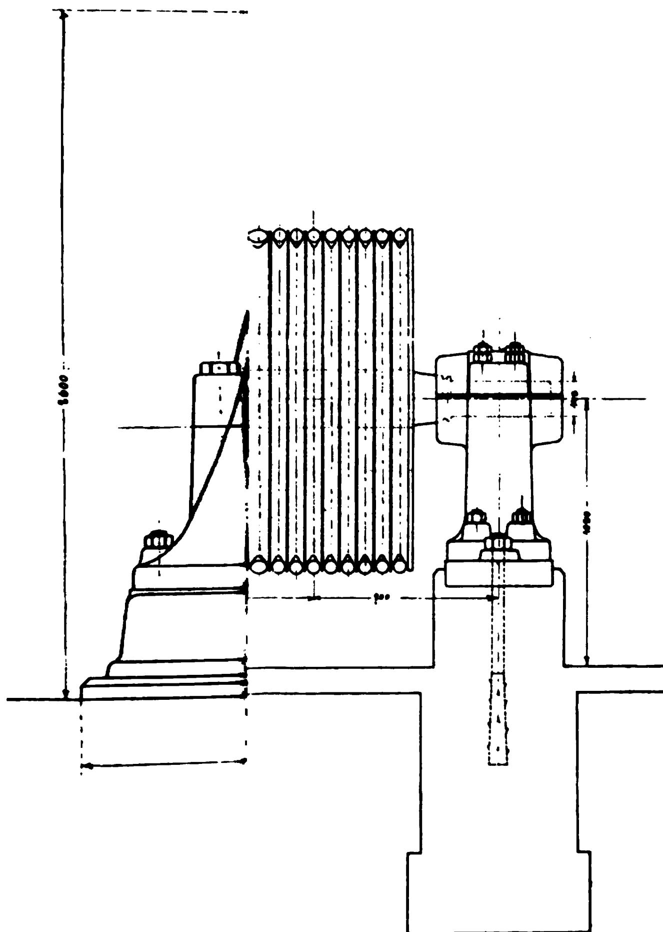
Fig. 572 Gleichpoltye mit vertikaler Welle 230 PS, 375 Touren, 5200 Volt.

Fig. 573 Aussenpoltype mit Ringanker, 110 PS, 500 Touren, 160 Volt, als rotierender Umformer verwendet.

Zum Ausschalten der Hochspannungsmaschinen werden die Röhrenausschalter Fig. 574 benützt.

Der 500 PS-Generator (Fig. 575) für Seilantrieb entstammt den Werk-
§ 245. Rieter. stätten von J. J. Rieter Winterthur. Er trägt Stabwicklung, die Stahlpole sind aufgeschraubt. Der Drehstromgenerator Fig. 576 u. 577 für 110 PS, 430 Touren, 4400 Volt hat nur abwechselnd bewickelte Pole.

1) Elektrot. Zeitschr.



Handb. d. El

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

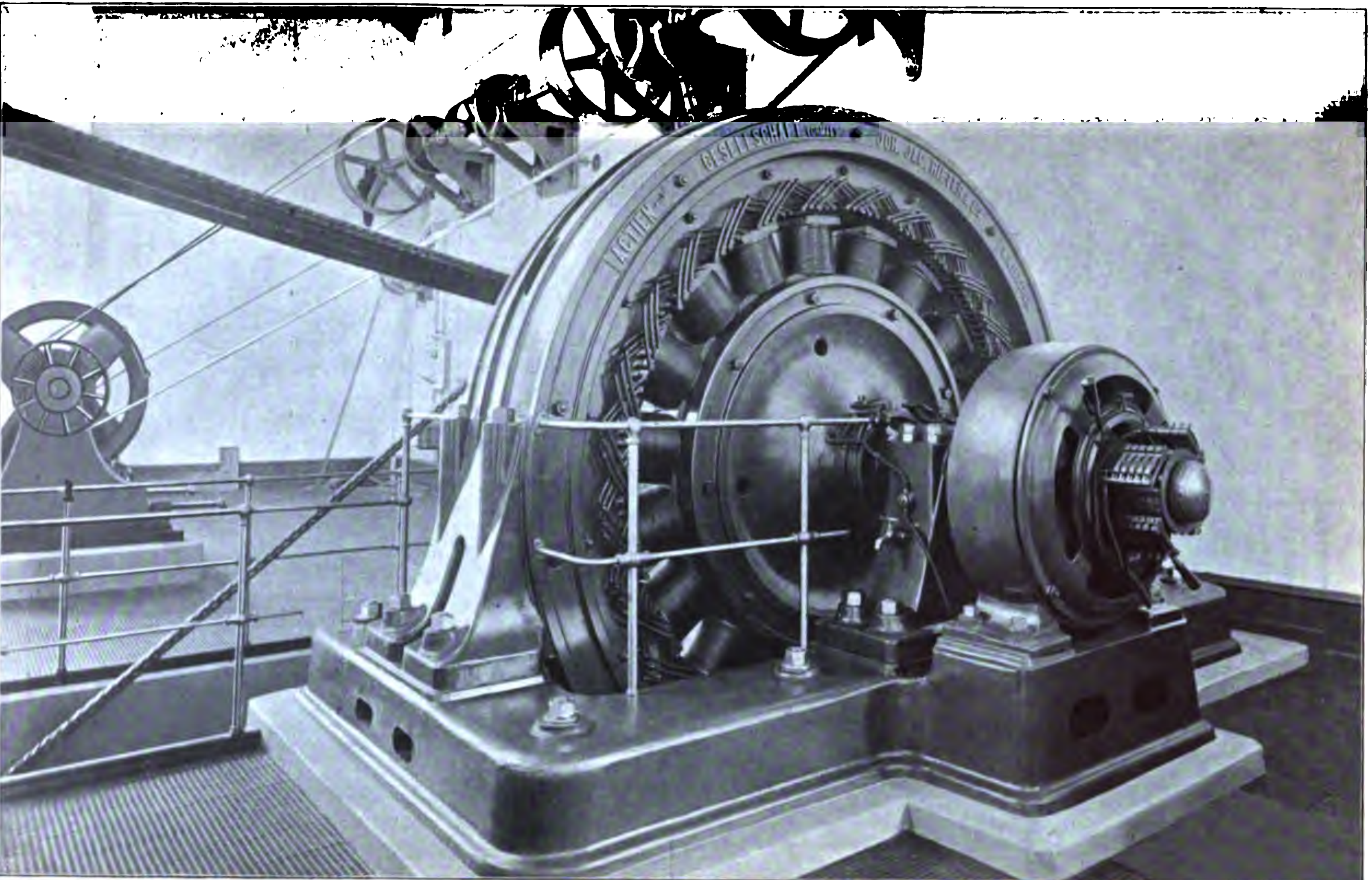


Fig. 577.

66. Wechselstrommaschinen amerikanischer Firmen.

§ 246. Fort Wayne. Die Wechselstromgeneratoren der Fort Wayne Electric Works (Wood-System) arbeiten entweder mit 140 oder mit 60 Perioden. Die Touren-



Fig. 578.

zahl der ersteren Type (Fig. 578) schwankt bei einer Leistung von 33 bis 400 KW zwischen 1680 und 467, diejenige der niederperiodigen Maschinen (Fig. 579) bei etwa gleicher Leistung zwischen 900 und 300. Die Pole sind

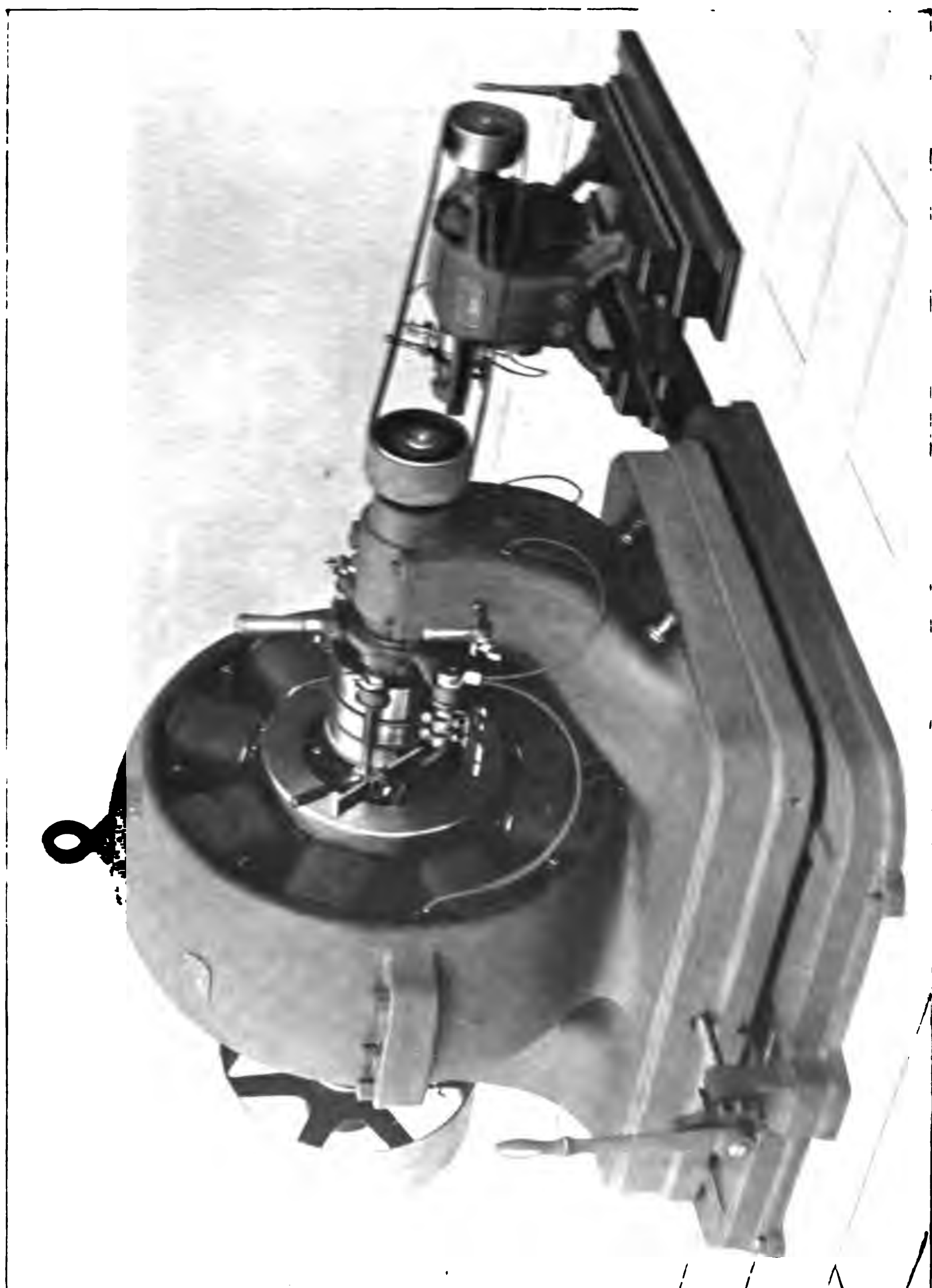


Fig. [illegible]

geblättert und in das Gestell eingegossen. Die Erregung ist compoundiert. Der Anker hat wenige grosse Nuten, die beinahe geschlossen sind. Die Erregerdynamo wird vermittelst Riemen angetrieben. Von dem rotierenden Anker werden Spannungen bis 2200 Volt abgenommen.

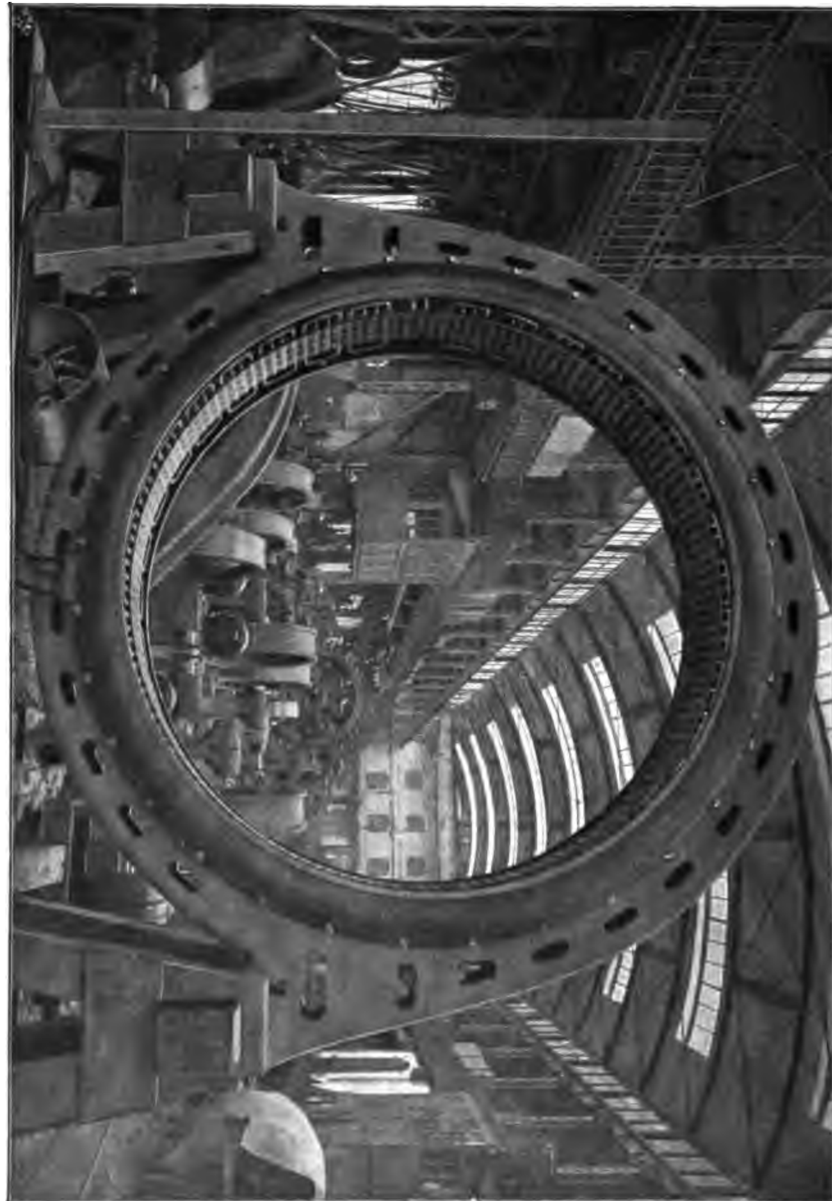


Fig. 580.

§ 247. Gen. El. Co. Die **General Electric Co. Schenactady**, deren Ausführungen für Deutschland bezw. Europa die **Union** E. G. Berlin übernommen hat, baut ihre Maschinen mit äusseren stationärem Anker. Der Rahmen ist starker Hohlguss. An ihm sind schwalbenschwanzförmig die gestanzten Eisenbleche befestigt, aus denen sich der Kern zusammensetzt. Jedes der Bleche ist mit

isolierendem Lack überzogen, um den Einfluss der Wirbelströme zu vermindern. An der inneren Seite des Kernes sind Nuten zur Aufnahme der Spulen ausgestanzt. Die Nuten sind so geformt, dass hölzerne Keile hineingeschlagen werden können, die die Wicklung festhalten. Jede Spule wird ein-

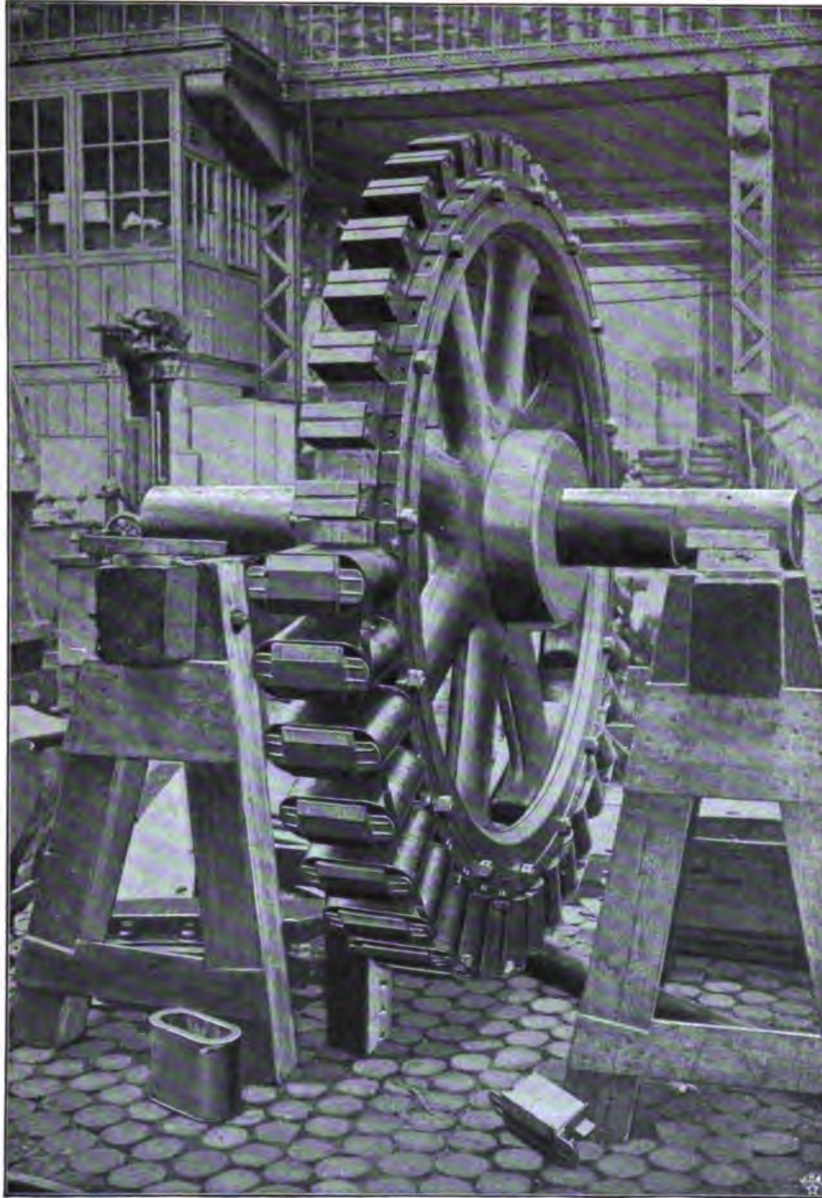


Fig. 581.

zeln geformt, isoliert und vor dem Einsetzen in den Anker geprüft. In Fig. 580 sieht man den fertigen Anker eines Drehstromgenerators mit horizontaler Achse.

Die Polkerne des Feldes bestehen aus Lamellen von weichem Eisen und sind durch schwalbenschwanzförmige Ansätze oder bei geringer Umfangs-

geschwindigkeit durch starke Schraubenbolzen auf dem gussstählernen Radkranz befestigt. Das ganze System wird von einem gusseisernen Stern getragen. Fig. 581 zeigt ein solches Magnetfeld. Die Kerne der oberen Hälfte liegen in der Figur bloss, während auf der unteren Hälfte schon die Feld-

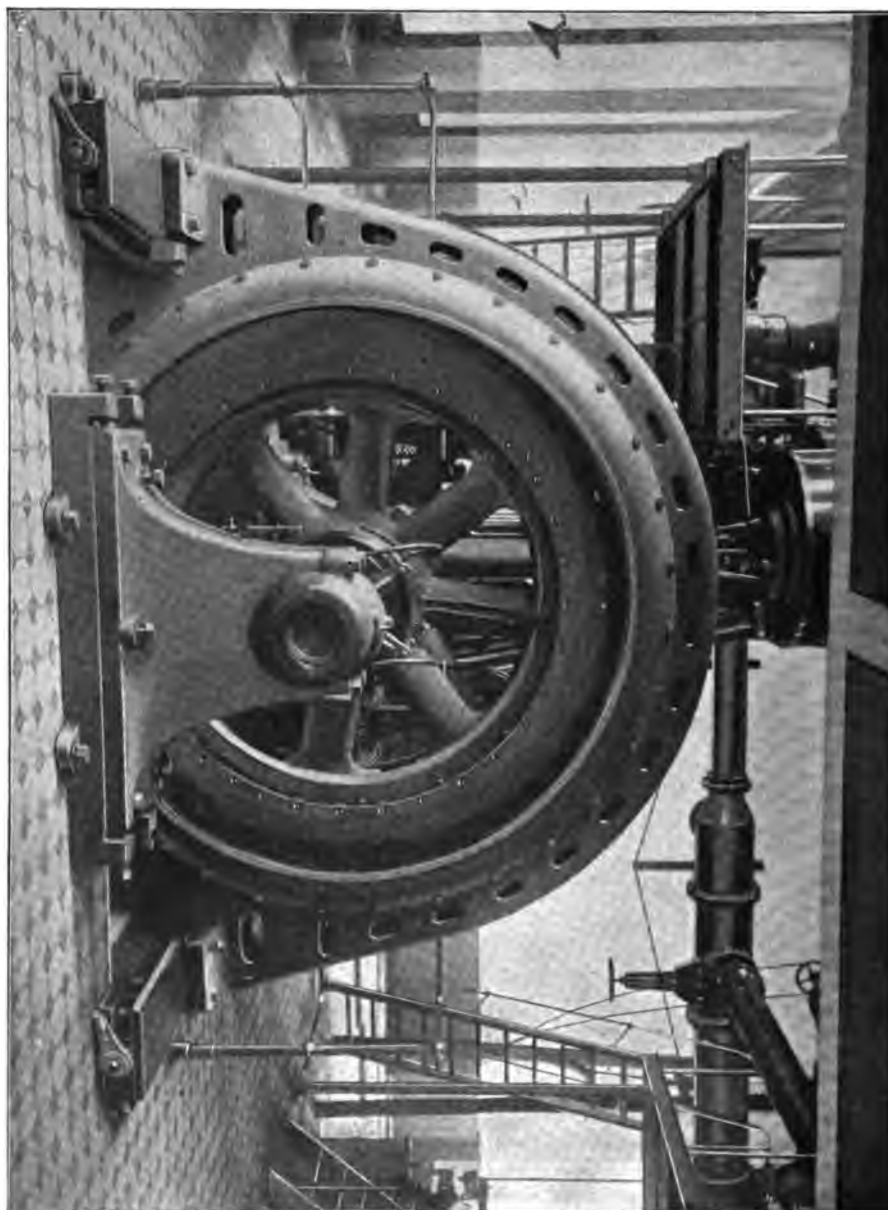


Fig. 581 a.

spulen angebracht sind. Bei kleineren Maschinen gelangen Feldspulen mit mehreren Drahtlagen übereinander zur Verwendung. Die Feldspulen der grossen Generatoren bestehen aus einer einzigen Lage von hochkantig gewundenem Kupferband, sodass die obere Fläche jeder Windung der kühlenden Wirkung der Luft ausgesetzt ist. Bei Rotation des Feldes cirkuliert die

Luft auch durch die Öffnungen zwischen den Armaturlamellen, sodass die Temperaturzunahme bei zehnstündigem Betrieb unter Vollbelastung 40 ° C. nicht übersteigt. Die Kollektoren für die Erregermaschine sind mit Kohlenbürsten ausgerüstet. Die Lager sind mit Ringschmierung versehen. Die normale Periodenzahl ist 50 pro Sekunde. Generatoren mit hohen Tourenzahlen für Riemenantrieb oder zur Kupplung mit schnelllaufenden Turbinen werden in zwölf Grössen für Leistungen von 10 bis 300 KW und für

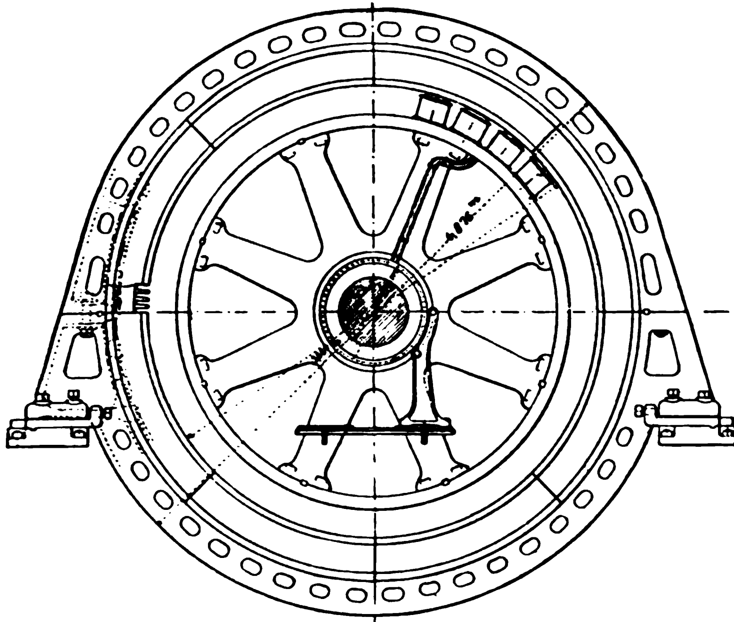


Fig. 582.

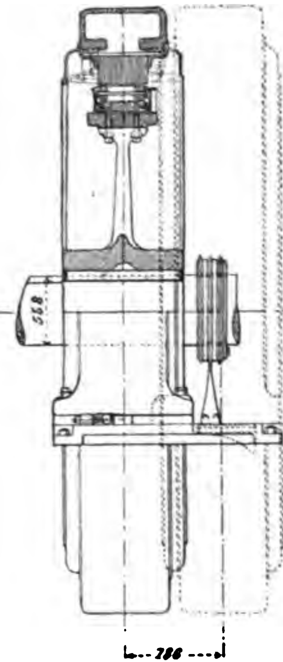


Fig. 583.

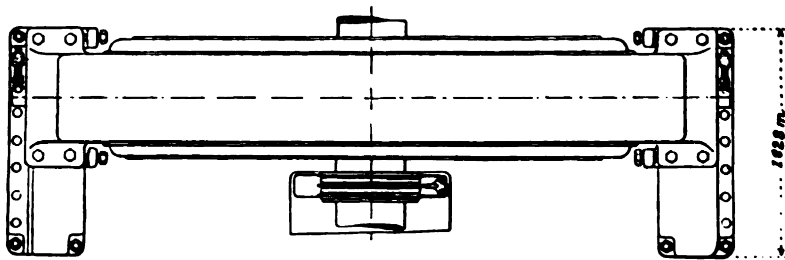


Fig. 584.

Spannungen bis 6000 Volt ausgeführt. Bei den Maschinen von 50 KW an aufwärts ist die Erregermaschine direkt gekuppelt.

Für eine Geschwindigkeit von 214 Umdrehungen pro Minute baut die U. E. G. spezielle Maschinen von 150 bis 500 KW-Leistung. Dieselben sind besonders für Turbinenantrieb geeignet und können gleich gut mit vertikaler wie mit horizontaler Welle ausgeführt werden. Die Maschinen dieser Type mit horizontaler Welle sind entweder mit zwei Lagern und Kupplungsflansch oder bei Verwendung von Riemenscheiben mit drei Lagern versehen. Sie werden sowohl mit als auch ohne angebaute Erregermaschine geliefert.

Generatoren mit geringen Tourenzahlen werden zur direkten Kupplung mit Dampfmaschinen für Leistungen von 100 bis 2000 KW gebaut. In Fig. 581 a ist eine Maschine dieser Type abgebildet. Dieselbe ist direkt mit

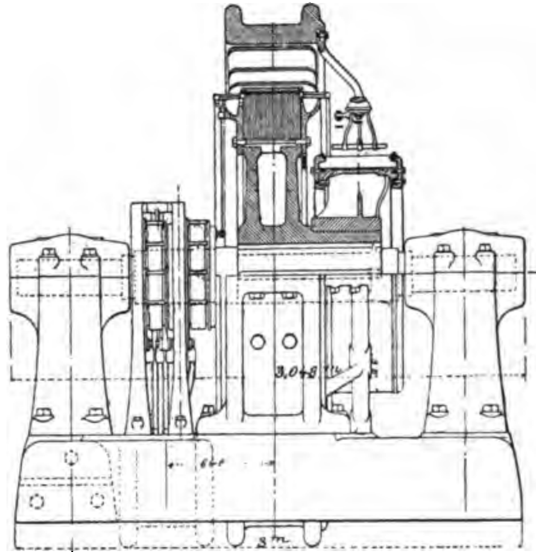


Fig. 585.

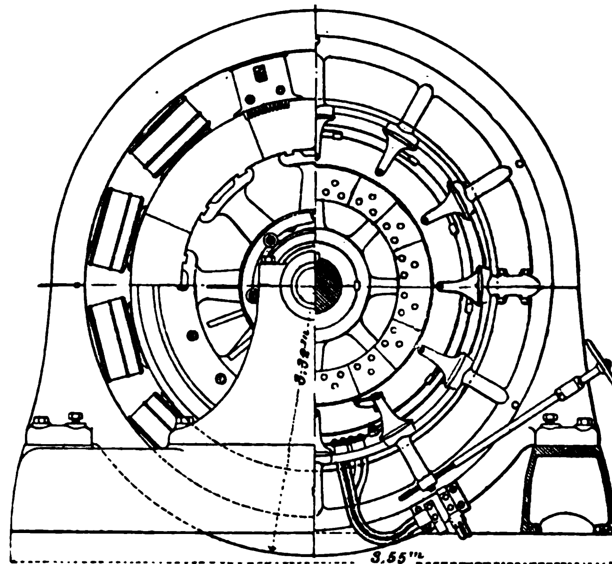


Fig. 586.

einer vertikalen Verbundmaschine gekuppelt; sie leistet 250 KW bei 125 Umdrehungen und liefert Drehstrom von 3300 Volt Spannung.

Das Gehäuse des dreiphasigen Generators (Fig. 582—584) für 850 KW kann auf die Seite gefahren werden. Der Wirkungsgrad dieser Maschine ist früher (Fig. 337) gezeichnet. Sie giebt 5000 Volt bei 25 Perioden. Der grösste

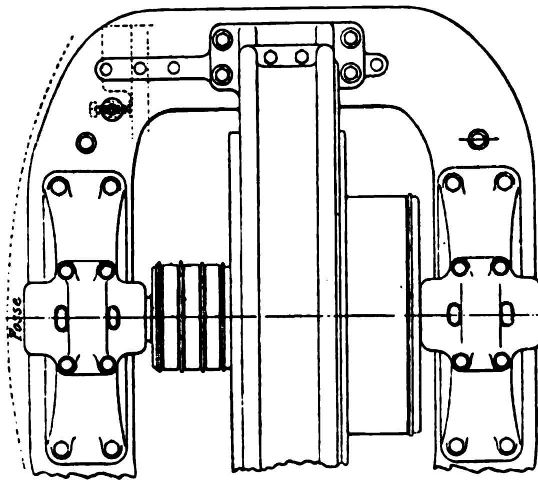


Fig. 587.

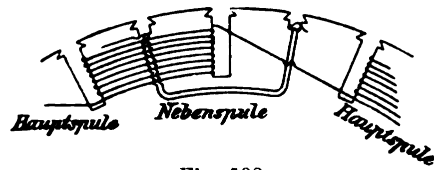


Fig. 588.

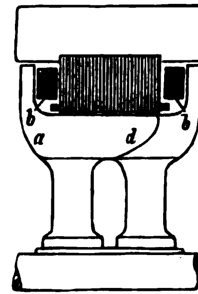


Fig. 589.

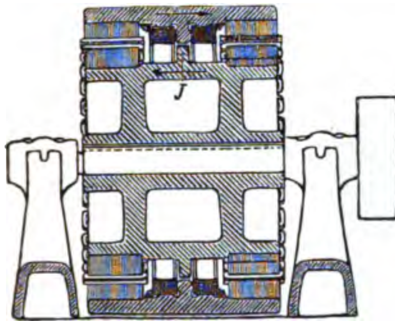


Fig. 590.

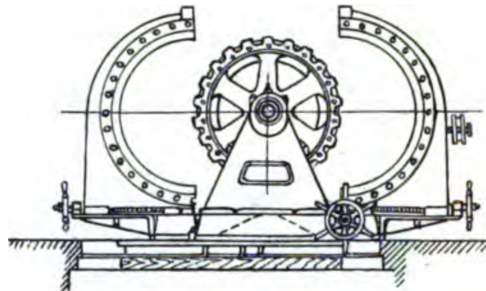


Fig. 591.

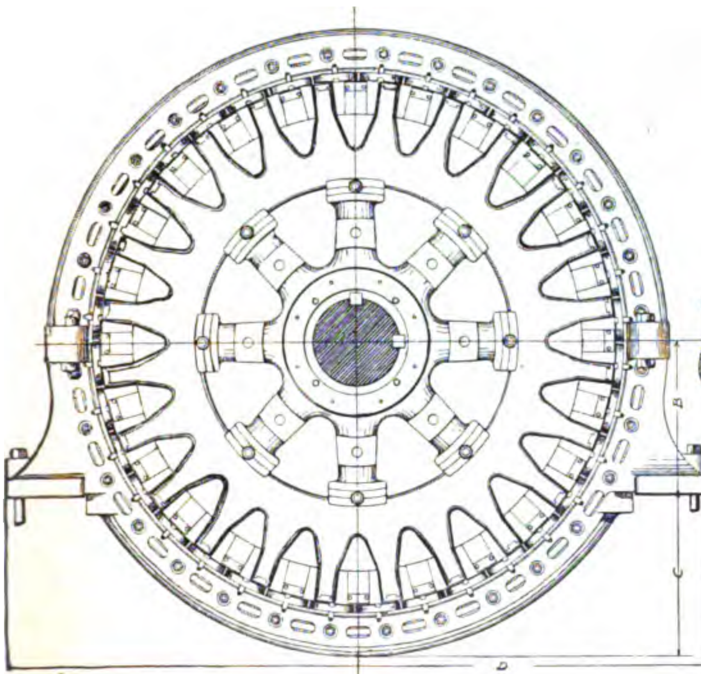


Fig. 592.

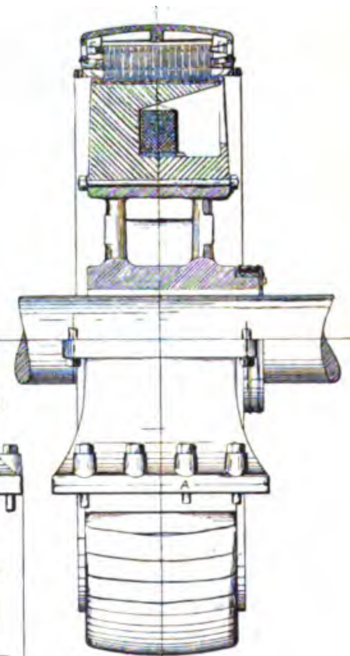


Fig. 593.

Durchmesser des induzierten Teils ist 4,876 m, es sind 3 × 64 induzierte Spulen vorhanden, ihre Stromdichte ist 1,55 Ampère pro mm². Die 32 Pole tragen Kupferband 25,4 × 1,6 mm. Die ganze Maschine wiegt ca. 35 000 kg.

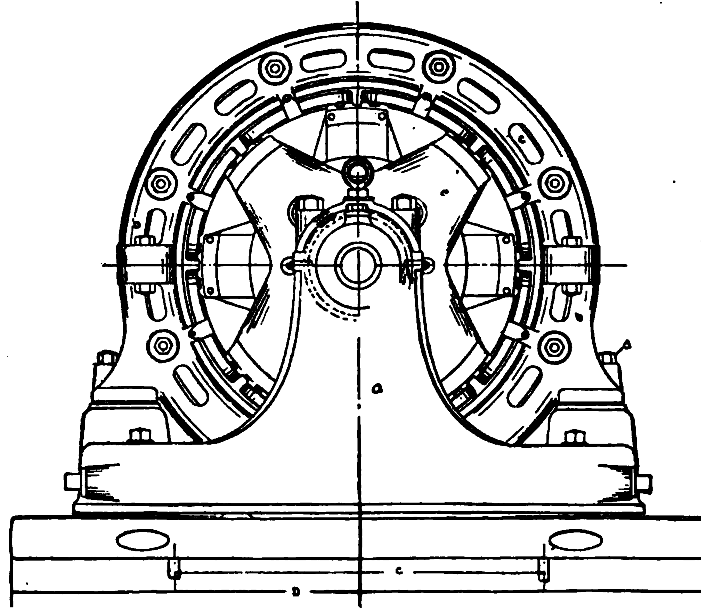


Fig. 594.

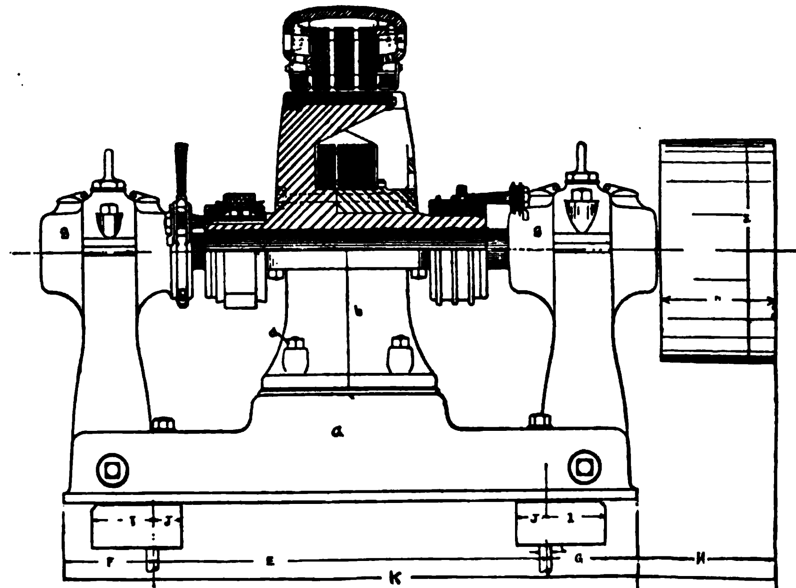


Fig. 595.

Ein typisches Bild einer Aussenpolmaschine, die allerdings als rotierender Umformer benützt ist, giebt Fig. 585—587.[1]) Diese Maschine liefert bei 250 Touren 900 KW.

1) Fig. 582—587 nach Ecl. électr. 1899.

Wie schon früher erörtert, versieht die G. E. Co. Maschinen für vorwiegende Lichtabgabe mit der sogenannten monocyklischen Wicklung, deren Ausführung durch Fig. 588 veranschaulicht ist.

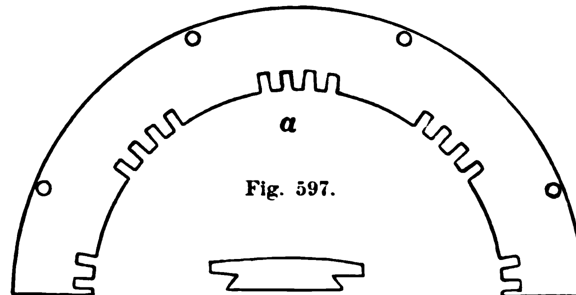


Fig. 597.

Fig. 596.

In Fig. 589 ist eine der Union E. G. patentierte Induktorwechselpoltype gezeichnet. Sie besitzt zwei Induktorräder *a*, welche zu beiden Seiten des Ankers angeordnet sind und durch die Erregerspulen *b* so magnetisiert werden,



Fig. 598.

dass die an dem Anker vorbeibewegten, abwechselnd dem einen oder dem anderen Induktorrad angehörenden Polhörner *d* entgegengesetzte Polarität haben.

Die Mehrphasenmaschine mit zwei Ankerstromkreisen (Fig. 590) ist ebenfalls der Union E. G. patentiert:

Die Ankerkerne und Feldmagnete der Maschine bilden nur **einen** magnetischen Kreis, der zur Ausgleichung der Feldstärken bei verschiedener Belastung der beiden Ankerstromkreise in seiner Mitte einen magnetischen Nebenschluss J besitzt, der den Überschuss der magnetischen Kraftlinien der einen Seite der Maschine in sich aufnimmt.

§ 248. Stanley. Das Gehäuse der zweiankrigen Gleichpoltype der **Stanley** El. Mfg. Co. ist vertikal geteilt (Fig. 591), die beiden Hälften können beiderseits auseinandergezogen werden. Die Maschinen sind gewöhnlich zweiphasig, jeder Anker für eine Phase. Um Spulendurchschläge beim Unterbrechen der

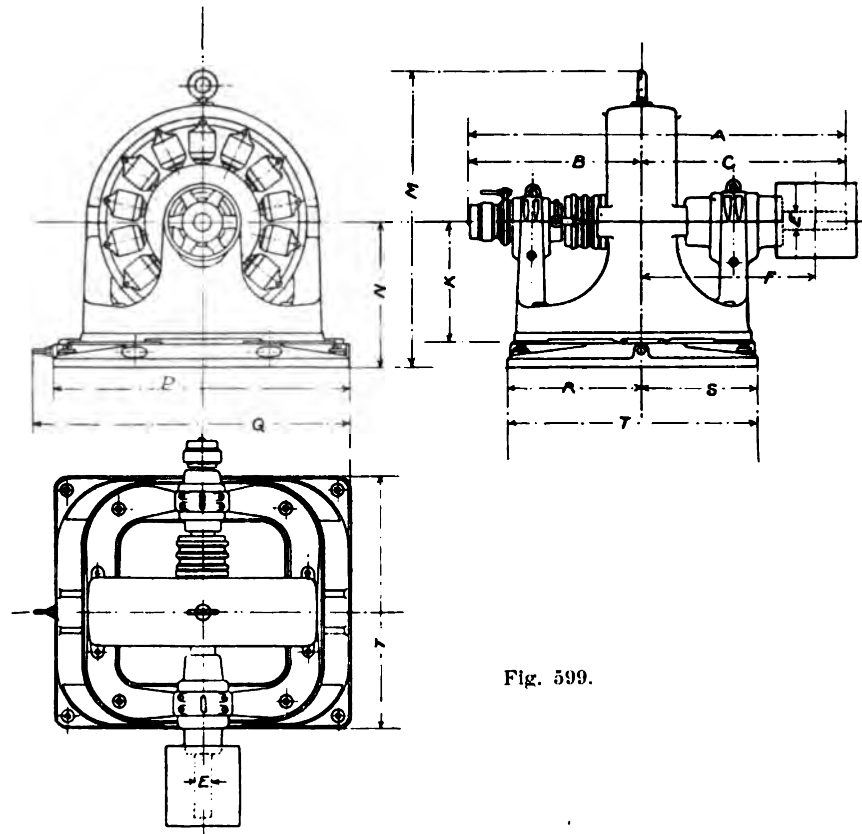


Fig. 599.

grossen Erregerspule zu vermeiden, ist diese Spule auf einen geschlossenen Kupferring gewickelt, der dämpfend wirkt.

§ 249. Walker Co. Die **Walker** Co. baute die Wechselpoltype Fig. 592—597. Die Pole sind geblättert und zwar ist die Form der Stanzstücke in Fig. 596 gezeichnet. Die Erregerspule besteht (Fig. 595) aus einer dünnen und einer dicken Wicklung, letztere dient zur Compoundierung mit Hilfe des Kollektors (Fig. 595), auf dem Kohlenbürsten schleifen. Für Einphasenmaschinen haben die Ankerbleche die Form (Fig. 597); die Spulen sind maschinengewickelt.

§ 250. Westinghouse Co. Der älteren **Westinghouse**-Maschinen ist schon in dem Abschnitt „Historisches“ gedacht. Die neueren Konstruktionen für Einphasenstrom liefern 16000 Polwechsel (133 Perioden), für Zweiphasenstrom (Fig. 598

u. 599) 7200 Polwechsel (60 Perioden). Die Pole sind geblättert und eingegossen. Die Maschinen werden gewöhnlich nach einem der Schemata Fig. 600 (zweiphasig) und 601 (dreiphasig) compoundiert. Es wird dabei

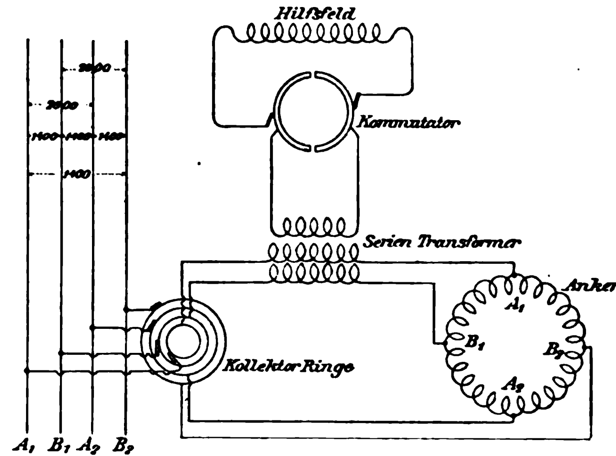


Fig. 600.

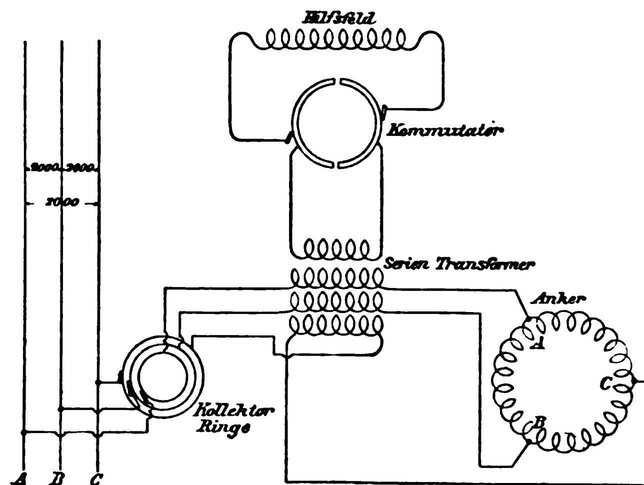


Fig. 601.



Fig. 602.

nicht der hochgespannte Strom, sondern Ströme reduzierter Spannung kommutiert. In Fig. 602 ist ein Anker mit Stabwicklung, die durch Holzkeile festgehalten wird, vier Schleifringen und Kommutator abgebildet. Es sind

zahlreiche Luftkanäle vorgesehen. Ein Polgehäuse ist in Fig. 603 für sich gegeben. Die Polbreite ist ziemlich gross, Polschuhe werden keine verwendet. Der rotierende Anker wird in der Liste bis 2200 Volt angegeben.



Fig. 603.



Fig. 604.

Für Hochspannung baut die WESTINGHOUSE Electric-Manufacturing Co. die Induktortype (Fig. 604 u. 605) mit einem Anker. Die Nuten sind offen, die Wicklung wird durch Keile gehalten. Die Polhörner bestehen aus ein-

gegossenen Blechen. Der Anker Fig. 606 und die Spule Fig. 607 gehören zu einem Gleichpolgenerator von 300 KW, 100 Touren.

Die bekanntesten Maschinen der Westinghouse Co. sind die grossen,



Fig. 605.

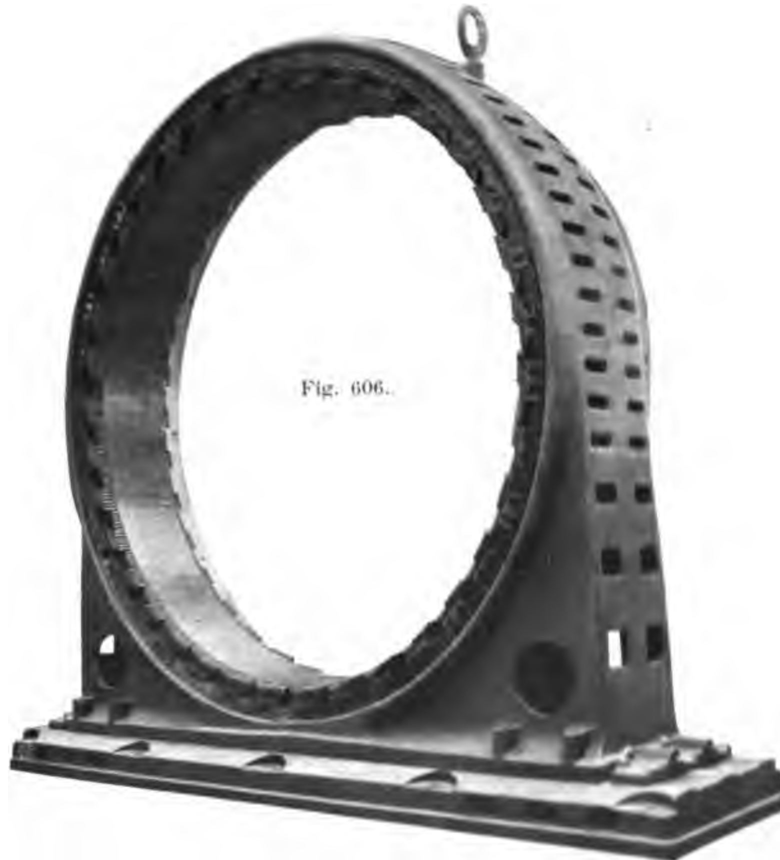


Fig. 606.

für die Niagarafälle gelieferten, für 3700 KW, 250 Touren, 2400 Volt pro Phase, zweiphasig: Fig. 608—611.[1]) Die Polwechselzahl ist nur 3000

1) Nach Z. V. D. J. Neuere Abbildungen siehe El. Anz. 8. Febr. 1900.

(25 Perioden). Das rotierende Magnetgestell hat aussen einen Durchmesser von 4,27 m. Der innenliegende Anker steht fest. Das Gesamtgewicht der Maschine ist 77000 kg, der Wirkungsgrad 97—98 Proc., die Umfangsgeschwindigkeit 47 m. Die Hochspannungsleitung wird in *T* abgeführt. Durch die Schleifringe *C* wird der Erregerstrom zugeführt. Bei dieser Aussenpolanordnung wirkt die magnetische Anziehung der Pole der Centrifugalkraft

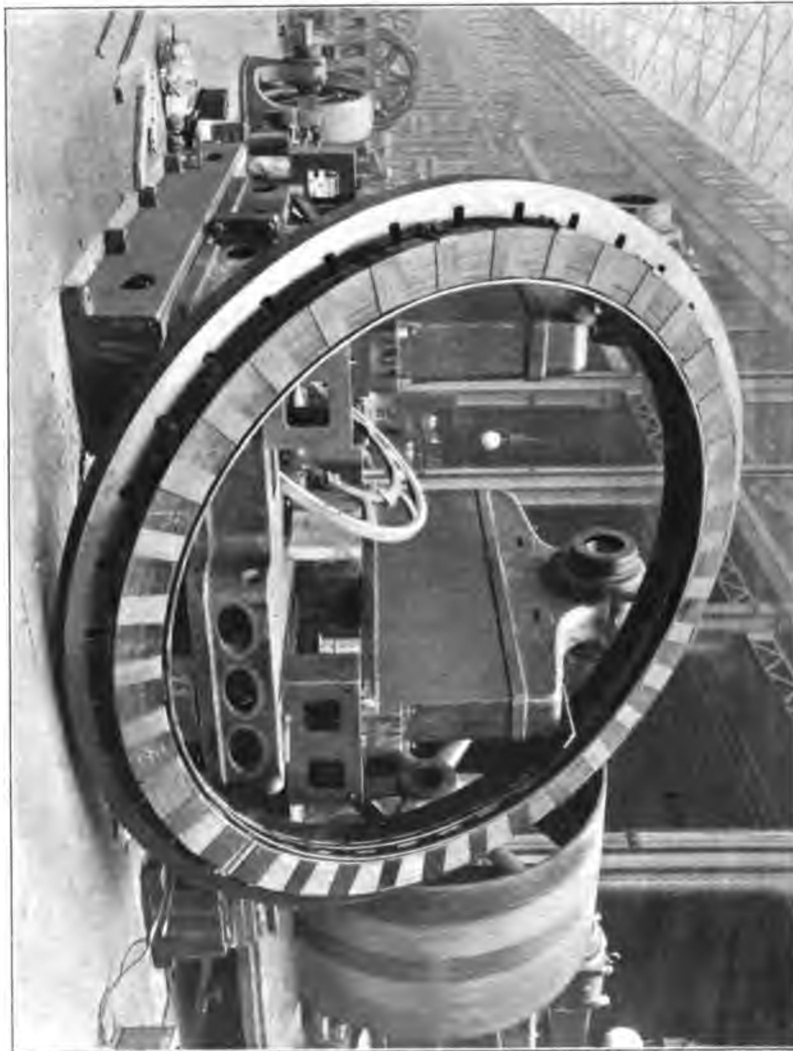


Fig. 607.

entgegen. Der Anker besteht aus Blechscheiben von $^1/_3$ mm Dicke und zwar aus elf Segmenten (Fig. 609). Es sind sechs Luftkanäle von 25 mm Breite freigelassen. Der Ankerring wird durch 66 Bolzen aus Nickelstahl, die ziemlich unmagnetisch sind, zusammengehalten. In den ersten Maschinen waren 187 Nuten 40 mm tief und 20 mm breit, fast geschlossen untergebracht, worein pro Nute zwei Flachkupferstäbe 11 × 34 mm eingezogen wurden. Die Verbindung geschah durch Gabeln, die vernietet und verlötet waren.

Der Luftzwischenraum betrug zunächst 25 mm. Die neueren Maschinen besitzen 322 Nuten mit Stäben 5,5 × 50 mm, die oben und unten halbkreisförmig abgeschlossen sind. Die Nuten haben einen 5 mm weiten Schlitz, während dieselben selbst 10.5 mm breit sind. Die Luft ist auf 19 mm reduziert. Die Pole sind massiv und aufgeschraubt. Die mittlere Zahnstärke ist 14. Die Stromdichte im Anker ist ca. 3 Ampère qmm. Der Kurzschluss-

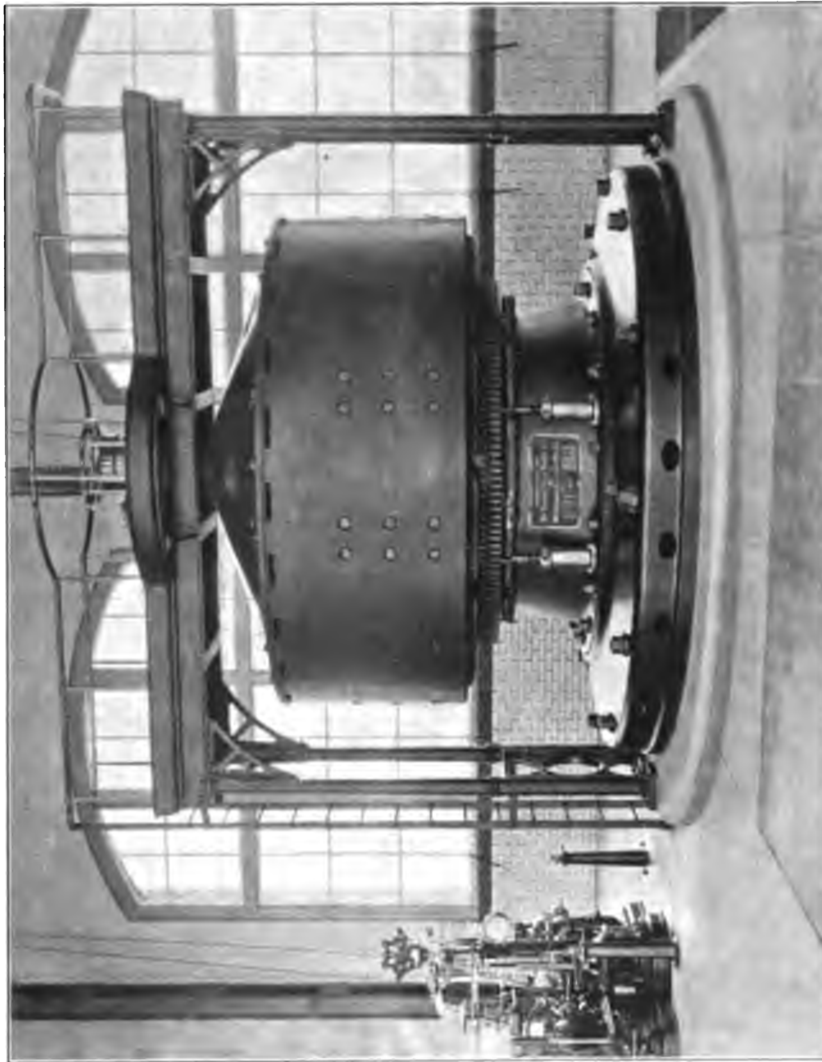


Fig. 608.

strom bei voller Erregung beträgt zweimal den normalen. Als Erregerkupfer ist solches mit 25 × 3 mm Querschnitt verwendet, bei einer Stromdichte von ca. 1 Ampère pro qmm. Polbreite: Teilung ist gleich 0,7. Der Magnetjochring ist aus einem Stück ohne Schweissnaht geschmiedet. Der Anker und die Lager haben Wasserkühlung.

In Fig. 612—614 sind Typen der Tesla-Generatoren für sehr hohe Frequenz gezeichnet. Die Maschine Fig. 612 u. 613 ist eine Wechselpoltype

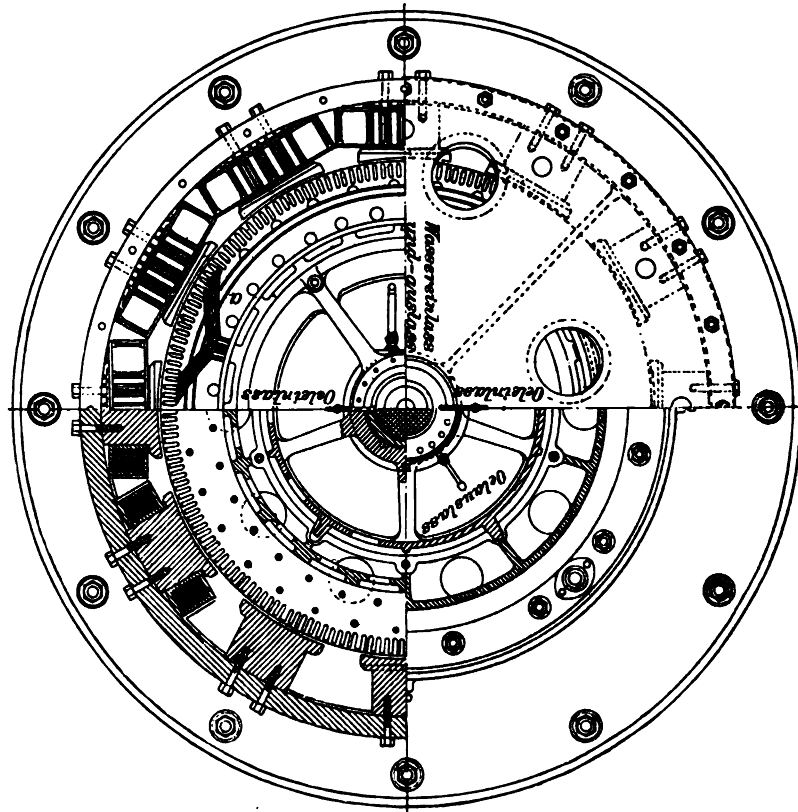


Fig. 610.

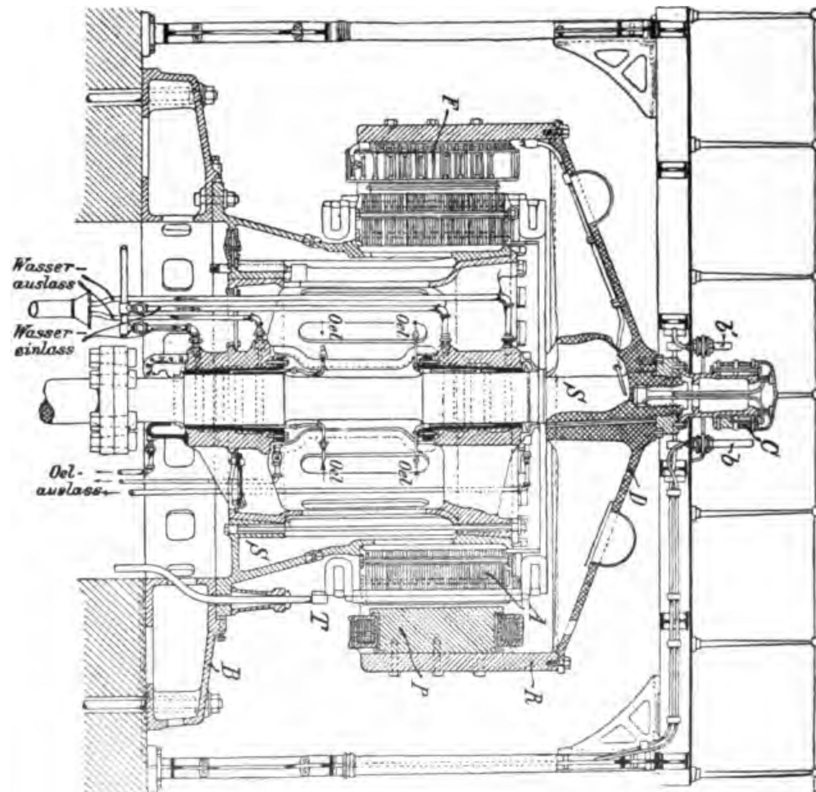


Fig. 611.

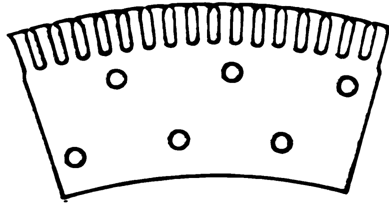
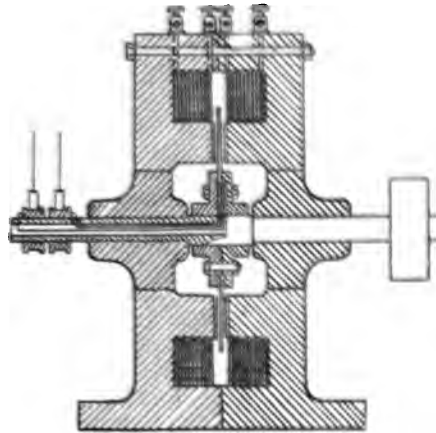


Fig. 609.



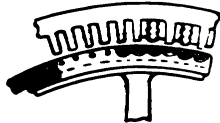


Fig. 612.



Fig. 613.

Fig. 614.

mit 400 Aussenpolen, 1600 Touren, also ca. 5000 Perioden. Der Ankerkern besteht aus Eisendraht. Feld- und Ankerwicklung verlaufen zickzackförmig. Die Maschine Fig. 614 ist eine Gleichpoltype mit rotierenden Ankerspulen, die aus einer Scheibe mit zickzackförmigen Einschnitten besteht. Bei 480 Polvorsprüngen ist die Periodenzahl etwa 15000.

67. Sonstige Wechselstrommaschinen.

Für hohe Frequenz eignet sich der Induktorgenerator Fig. 615 von Cail-Helmer. Erregerspulen und induzierte Wicklung liegen beide auf denselben Polstücken, die mit zahlreichen Zähnen versehen sind, ebenso wie das rotierende Induktorrad. Bei dreiphasigem Wechselstrom erhält man das Bild Fig. 616. § 891 Cail-Helmer Fairbanks.

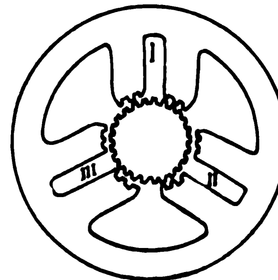


Fig. 616.

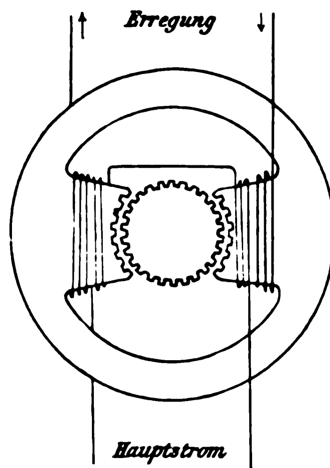


Fig. 615.

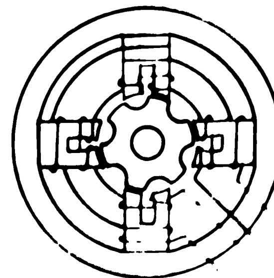


Fig. 617.

Fairbanks hat die früher behandelte Gleichpoltype von CAIL-HELMER dahin abgeändert, dass die Polstücke erst in ihrem inneren Teil geschlitzt

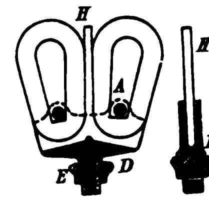
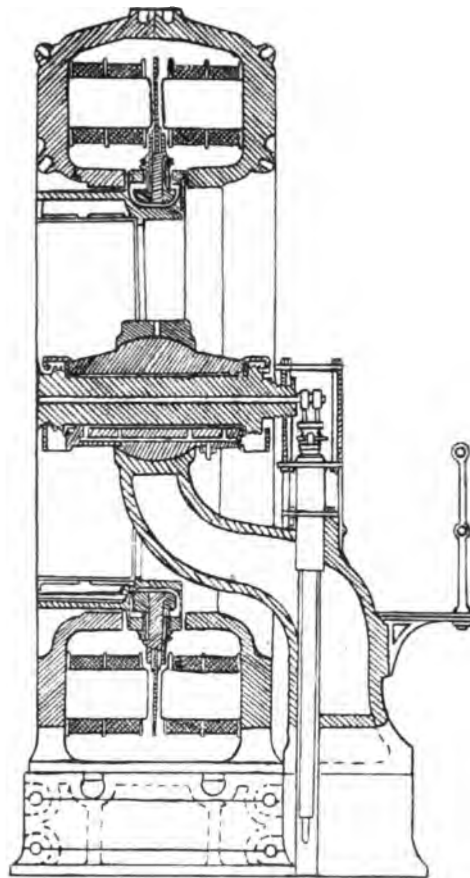
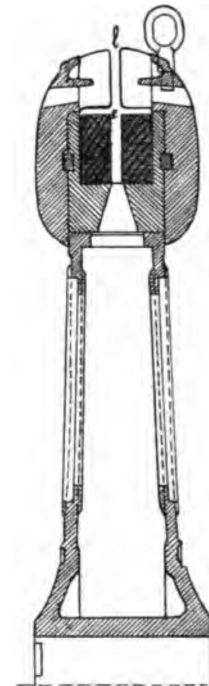
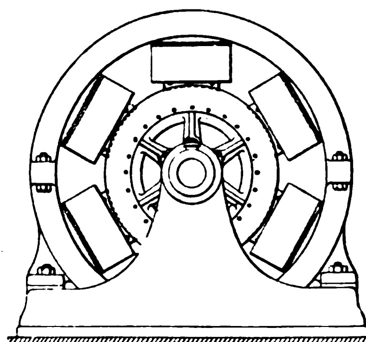
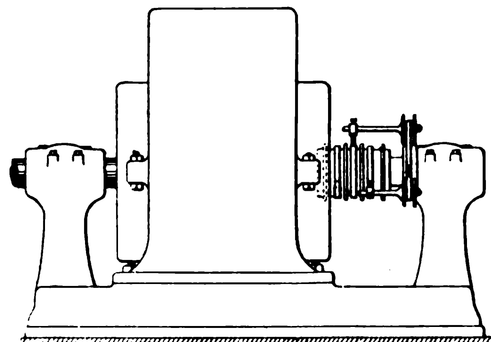


Fig. 619.


Fig. 618.


Fig. 620.


Fig. 621.


Fig. 622.

sind (Fig. 617). Die beiden Zacken tragen die induzierte Wicklung, das ganze Polstück die Erregerspulen; es ist bei dieser Anordnung die Rück-

wirkung auf die Erregerwicklung sehr vermindert, da der Kraftlinienfluss sich im wesentlichen nur in den Zacken ändert.

Die Scheiben- bezw. Spulenanker von Ferranti sind früher schon behandelt. In Fig. 618 ist eine grössere Maschine von Ferranti im Schnitt gezeichnet.[1] § 288. Ferranti, Maschin.

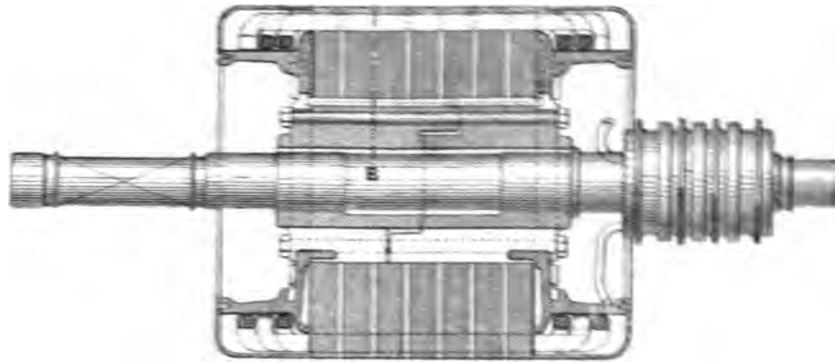


Fig. 623.

Der mittlere Durchmesser ist 4.57 m. $r = 30$ m. $\kappa = 120$. 2×48 Magnete mit Schmiedeisenkernen. Die Maschine hat besondere Ölcirkulation mit Wasserkühlung. Die Schleifringe werden durch die hohle Achse gespeist. Die ganze Stromabführung ist durch ein Glasgehäuse abgeschlossen, das elektromagnetisch durch den Erregerstrom verriegelt wird. Eine Spule ist



Fig. 624.

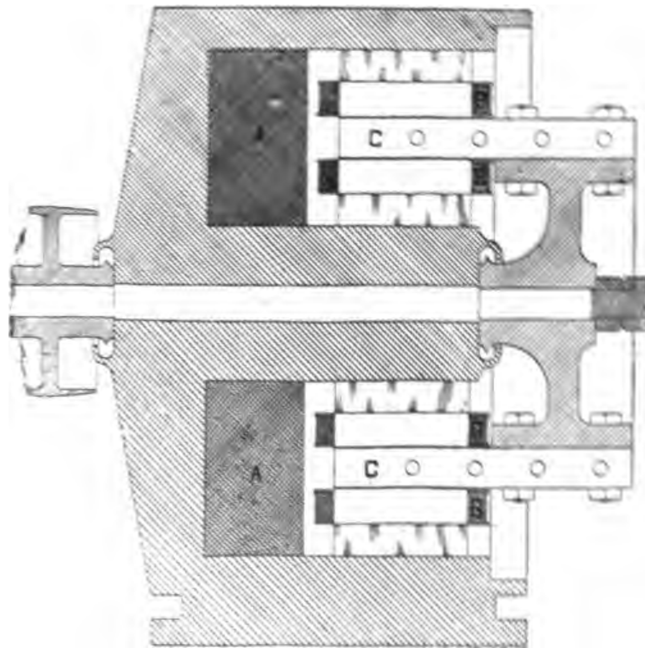


Fig. 625.

in Fig. 619 gezeichnet: Der Spulenanfang ist mit dem Kupferringe A verlötet, H ist Ebonit, D eine Bronzegabel, alle Zwischenräume sind mit

1) Nach E. T. Z. 1891.



Fig. 626.

Schwefelzement ausgegossen. *E* ist eine Porzellantülle. Jede Spule erzeugt 416 Volt, 55 Ampère, total 7500 Volt.

Neuerdings sind in der Zentrale Deptford derartige Generatoren für 10000 Volt, 150 Ampère = 1500 Kilovoltampère in Betrieb genommen worden. Die 64 Spulen aus Kupferband sind mit Seide und Vulkanfiber

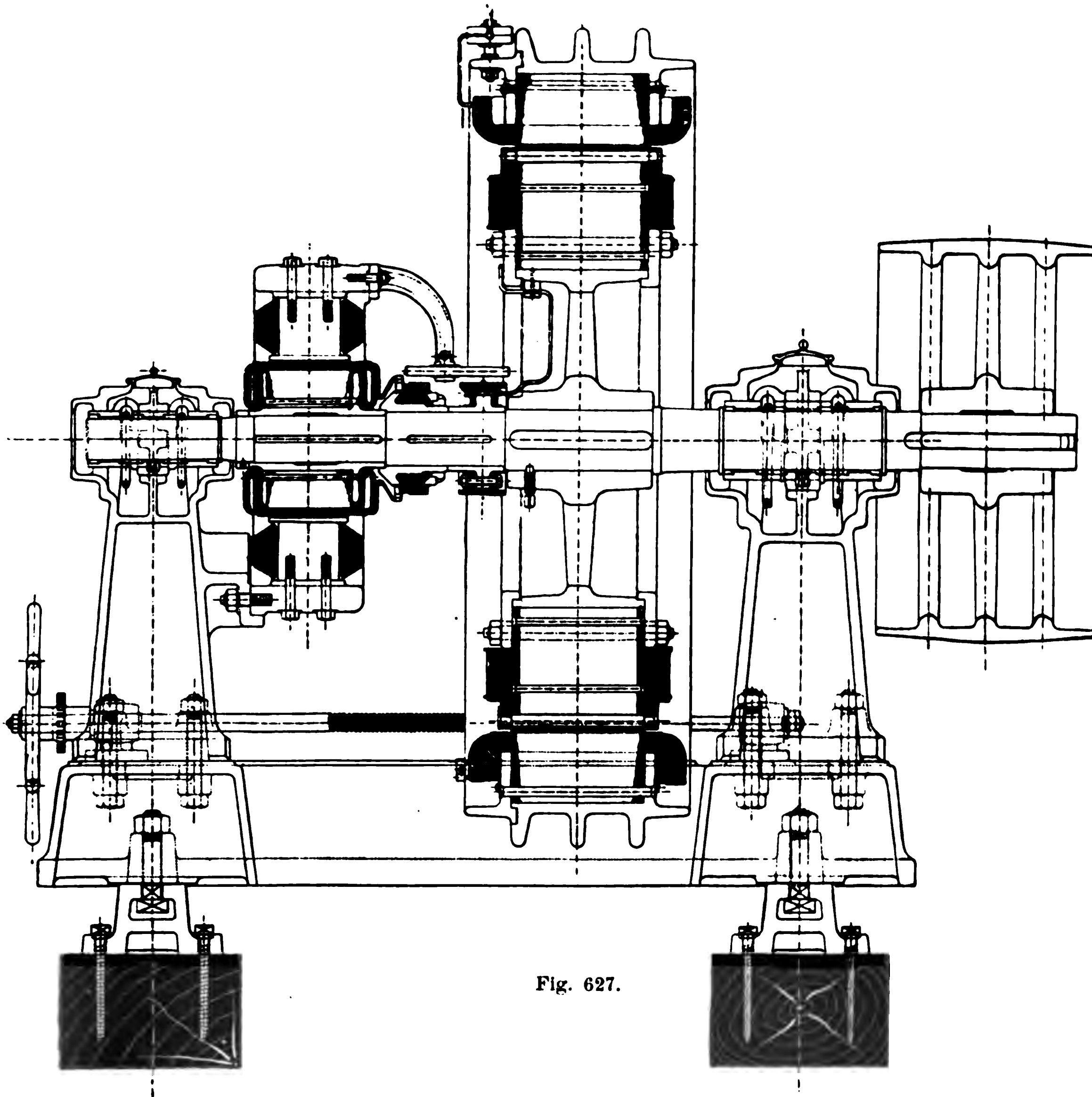


Fig. 627.

isoliert, mit lamellierten Messing- und Asbestkernen versehen und unter Zwischenlegung von Glimmer auf ein Rad geschraubt. Die 128 Magnete sind mit Kupferband bewickelt. Die Umfangsgeschwindigkeit ist über 50 m/sek.

Das rotierende Magnetgestell einer MORDEY-Maschine (siehe Fig. 89) für 200 KW, 2000 Volt, 96 Touren ist nach S. THOMPSON in Fig. 620 gezeichnet.

Der Scheibenanker ragt in den Schlitz *l* herein, *e* ist die gemeinsame Erregerspule.

§ 258. Parshall. **Parshall** hat für die Dubliner Strassenbahn den Dreiphasengenerator Fig. 621—624 entworfen; er leistet 150 KW, 2500 Volt bei 600 Touren und 30 Perioden. Die Induktionen der Maschine sind:

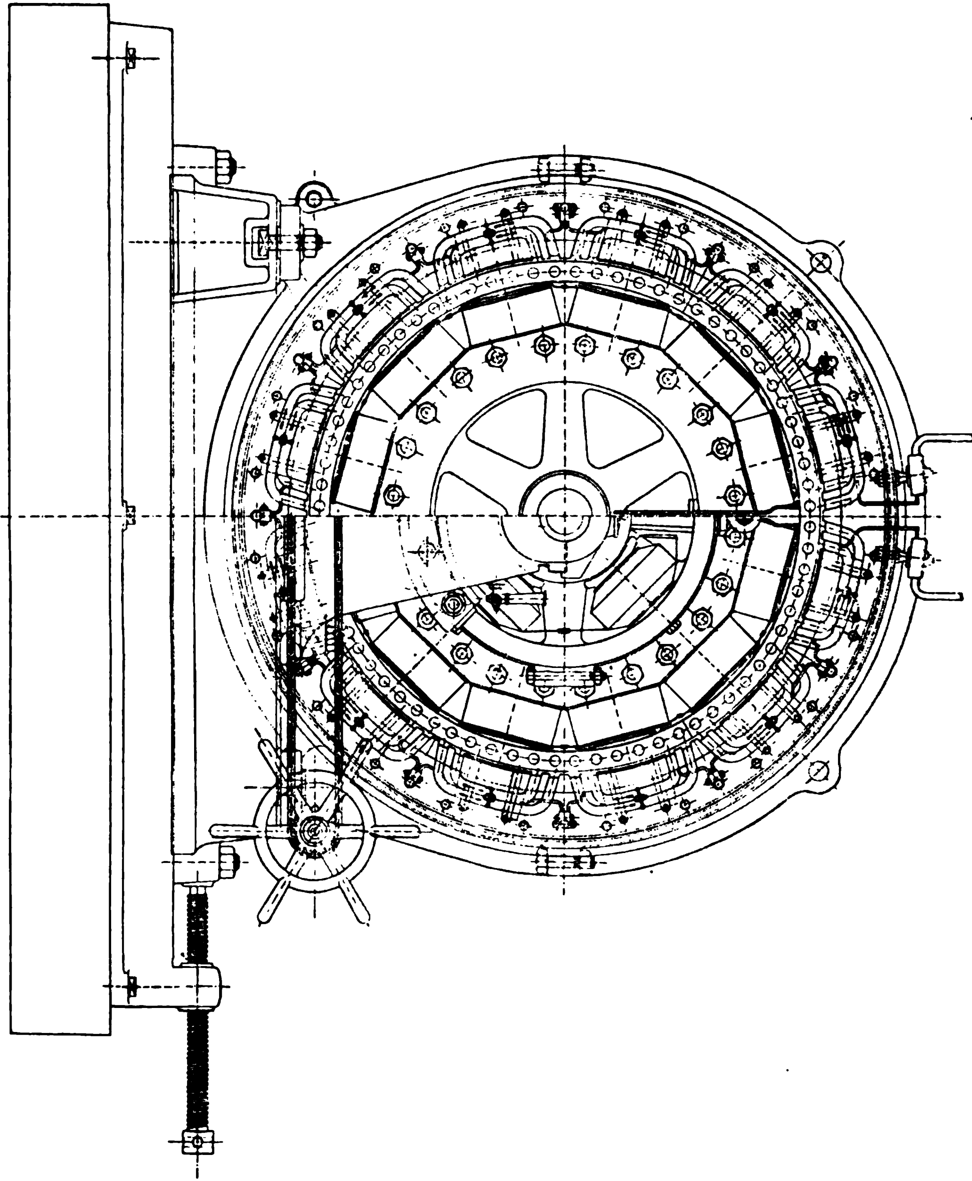


Fig. 628.

Zähne	15400
Kern	7700
Luft	7300.

Die Stromdichte ist 2,1 Ampère/qmm und die Übertemperatur 30°. Der Wirkungsgrad beträgt 92 Proc. (Min. Proc. Inst. C. E.)

Die Maschine von PIKE & HARRIS (Fig. 625) besteht aus einem Topfmagnet, worin die erregende Spule A liegt. Es sind zwei Kränze mit Zacken, welche die induzierte Wicklung tragen, feststehend vorgesehen, zwischen denen das Polrad C rotiert. § 264 Pike & Harris

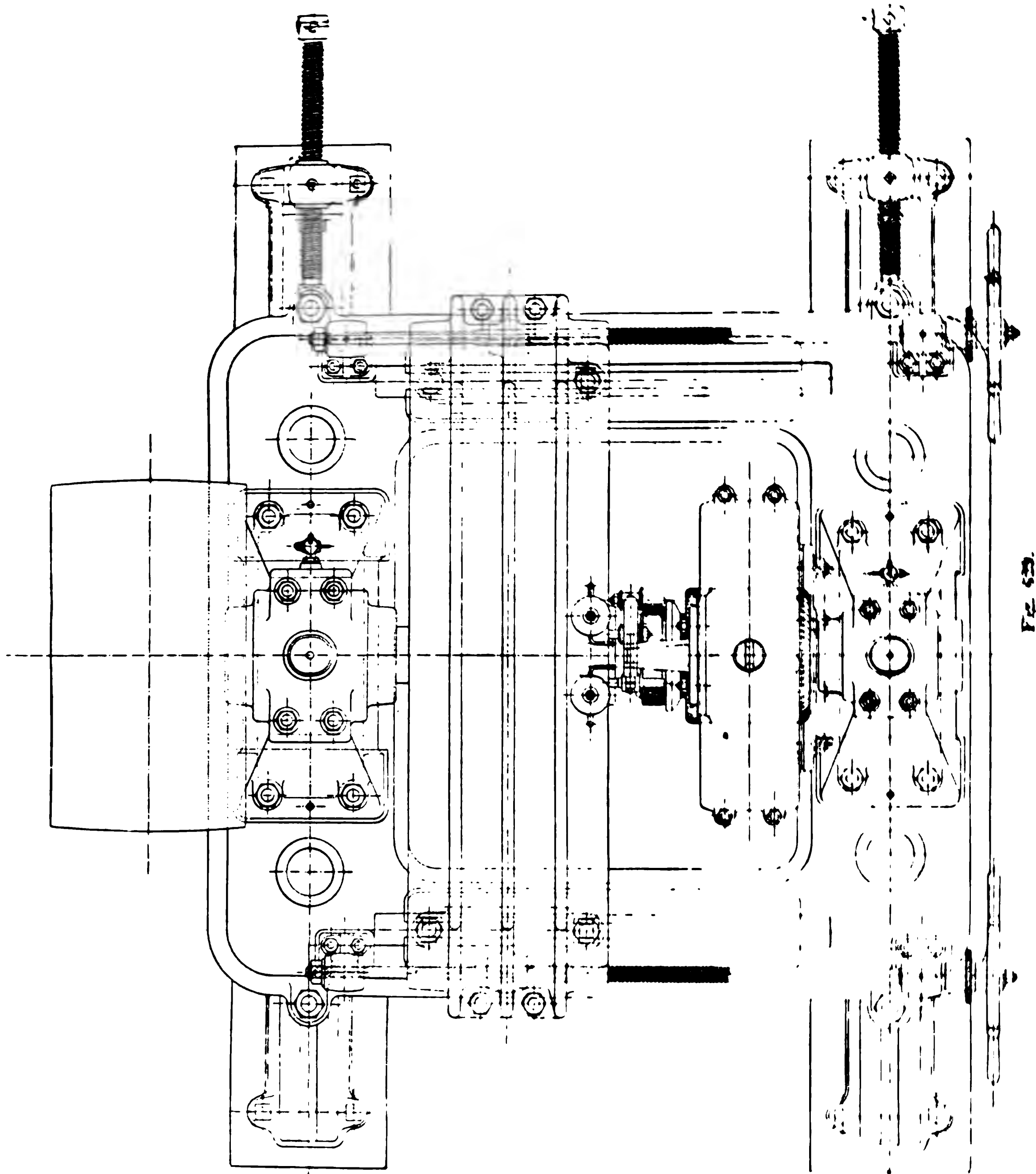


Fig. 625.

Für eine Maschine von J. Farcot St. Ouen, die nach den Patenten von HUTIN & LEBLANC ausgeführt und die schon in Fig. 382 abgebildet ist, gelten nachstehende Angaben: § 266 Farcot

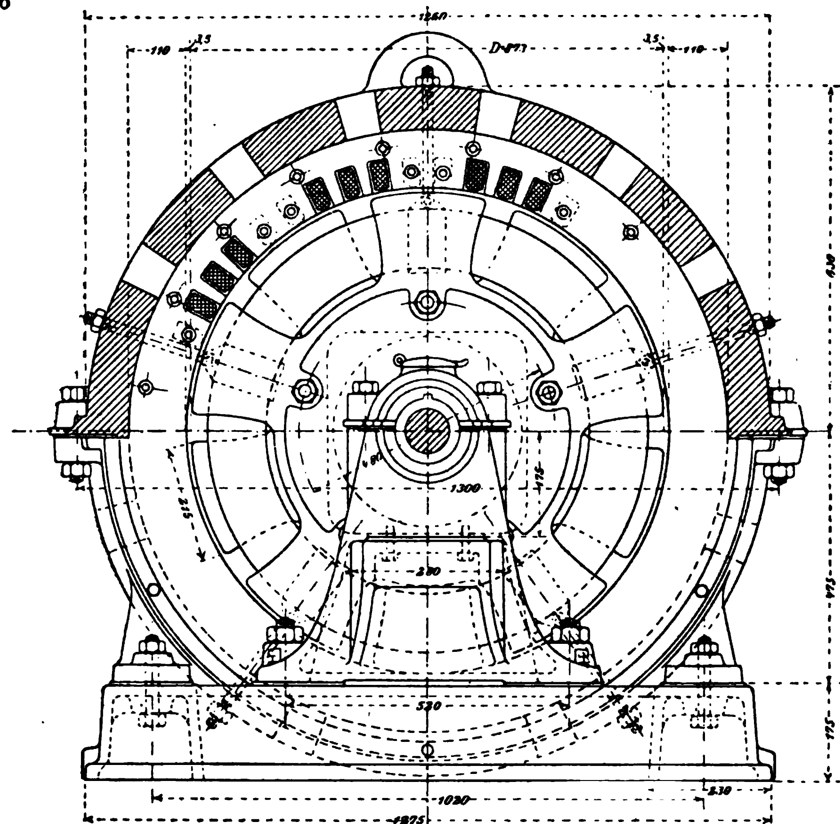


Fig. 630.

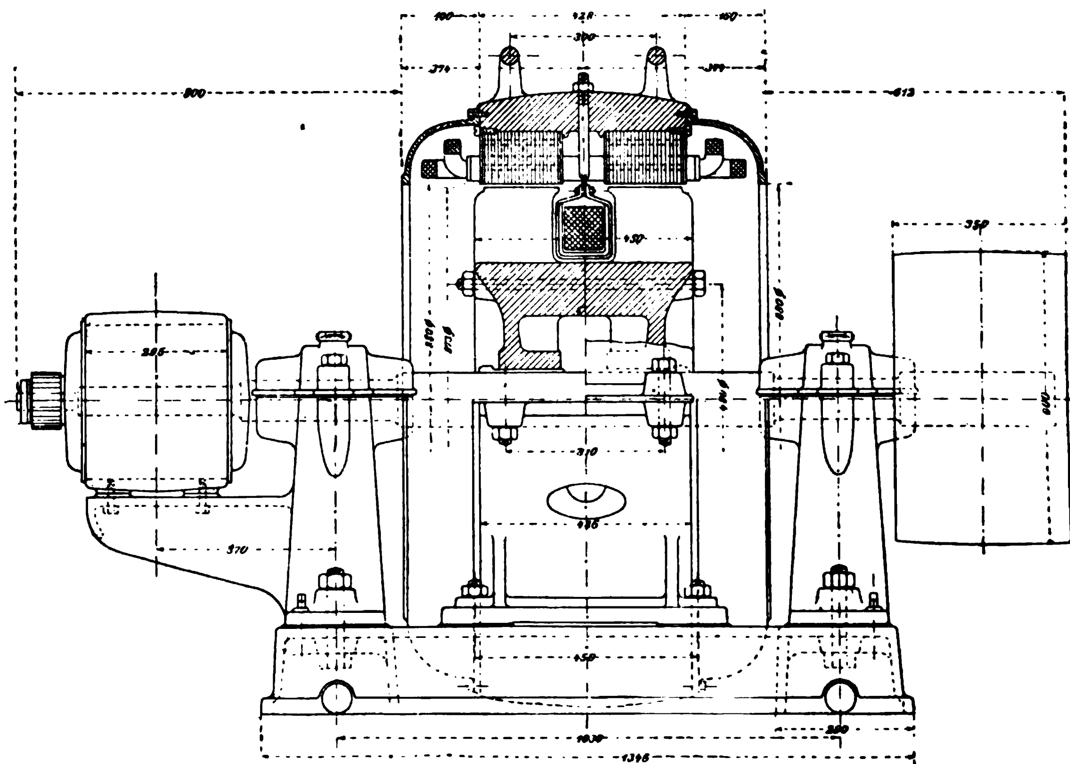


Fig. 631.

Leistung: 600 Kilovoltampère bei 3000 Volt, 60 Touren.

Pole: 80, Frequenz 40.

Blechdicke der Pole: 2 mm, Erregerdraht 13,4 qmm. Vier Gruppen Erregerspulen parallel.

Dämpfer: Sechs Bolzen pro Pol aus Kupfer 530 qmm.

Induktordurchmesser 5,970 m.

Induzierte Wicklung: 80 Spulen in zwei parallelen Kreisen.

Spulenisolation: Mikanit und Hartgummi.

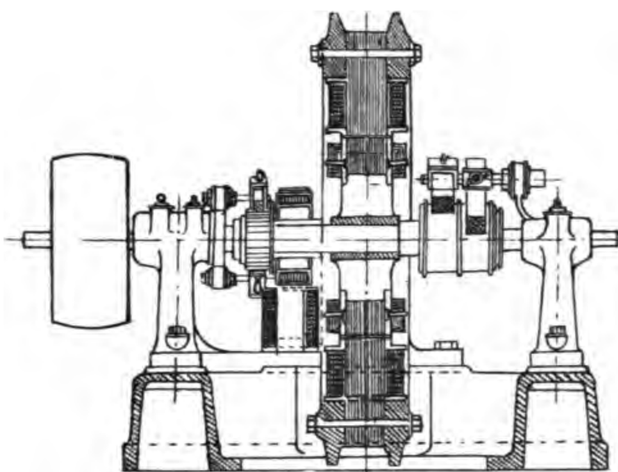


Fig. 632.

Äusserer Durchmesser: 6,870 m. Wirkungsgrad: 92 Proc.

In Fig. 626 ist eine grosse derartige Schwungraddynamo für 350 KW abgebildet und in Fig. 627—629 detailliert gezeichnet: Letztere Maschine ist einphasig mit vier Nuten pro Pol. Die Nuten sind offen und nicht radial. Die Spulenenden sind durch besondere Klemmschrauben verbunden. Die Pole sind geblättert. Das Gestell kann durch Spindeln über den rotierenden Stern weggeschoben werden. Die Erregerdynamo liegt noch innerhalb des Lagers. Kollektor und Schleifringe liegen direkt nebeneinander mit gemeinsamen Bürstenstiften. Das Feldgestell ist an den Lagerböcken verschraubt.

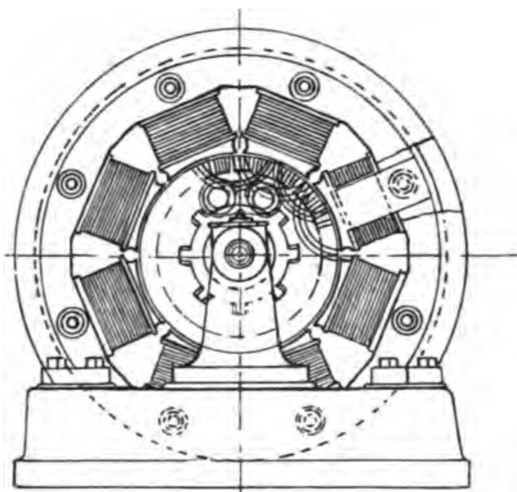


Fig. 633.

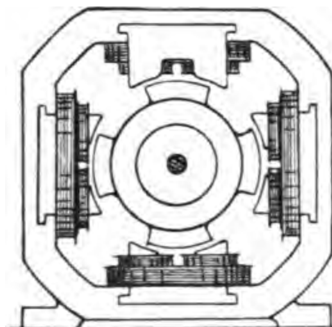


Fig. 634.

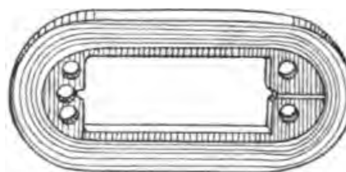


Fig. 635.

Der Gleichpolgenerator Fig. 630 u. 631[1]) wird von Fabius Henrion, § 256. Henrion. Labour. Laval. Patin.

1) Nach E. T. Z 1898.

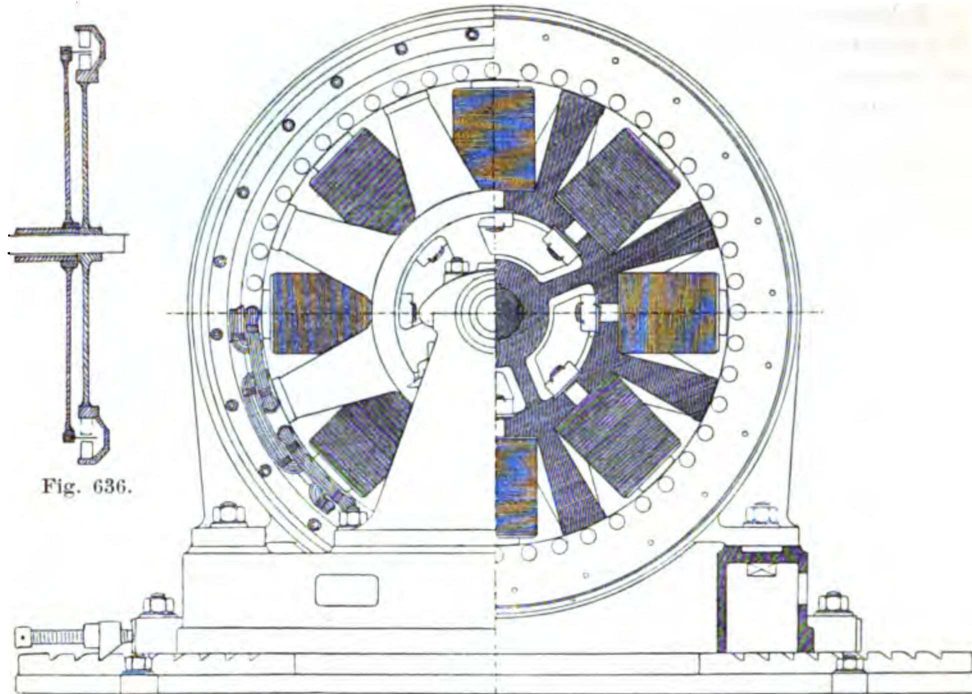


Fig. 636.

Fig. 637.

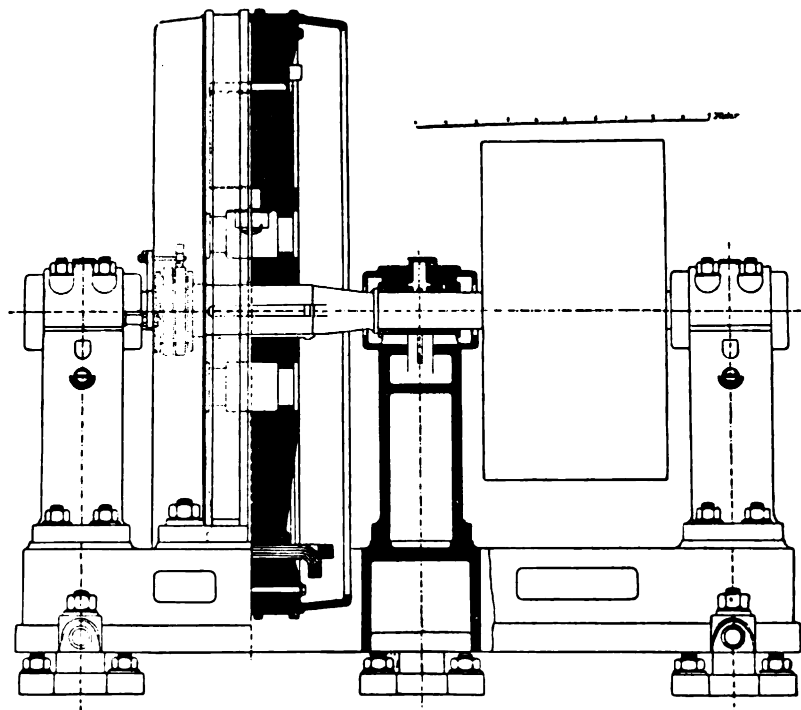


Fig. 638.

Nancy gebaut. Er leistet 54 Kilovoltampère bei 600 Touren und 3000 Volt. Die 30 Nuten enthalten je 39 bis 40 Drähte von 3 mm Durchmesser. Die Erregerspule besteht aus 2,5 mm Draht.

Der Zweiphasengenerator (Fig. 632 u. 633) System Labour ist für Leuchttürme bestimmt. In jeder Phase liegt ein Scheinwerfer. Die Maschine liefert 45 Volt pro Phase und 25 Ampère. Ihre Charakteristik ist in Fig. 251 gegeben. Die Tourenzahl ist 810, der Wirkungsgrad ca. 75 Proc., die Luftinduktion 4000 (Engineering).

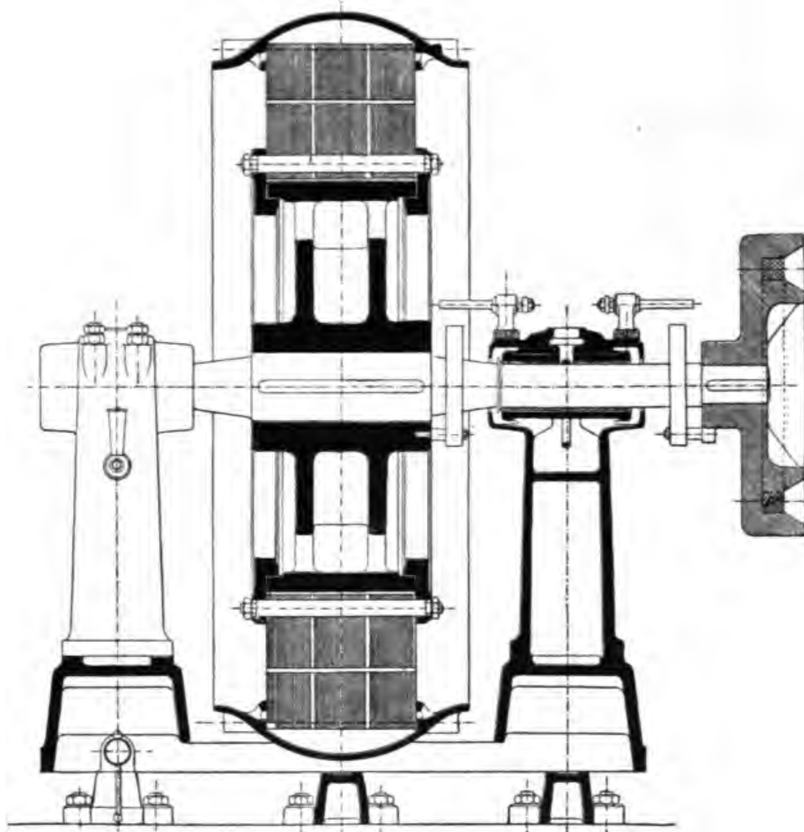


Fig. 639.

Die Société de Laval konstruiert die Induktortype Fig. 634. Die grossen Spulen dienen zur Erregung, die kleinen werden induziert. Es rotiert ein Stahlrad.

Der Anker der Patin-Maschinen besteht aus flachen Kupferbandspulen (Fig. 635), die zwischen einem rotierenden Doppelkranz von Polen liegen (Fig. 636). Sie eignen sich besonders für direkte Kupplung.

Die Konstruktion einer Innenpolmaschine für 300 PS von Belloni e Gadda Milano ist aus Fig. 637 u. 638 ersichtlich. § 257. Italienische Firmen.

Der 300 pferdige Drehstromgenerator Fig. 639 u. 640 von Brioschi, Finzi & Co. hat geblätterte Pole und zwar alle aus einem Stanzstück. Die Ankerbleche sind in eigenartiger Weise in einen Hohlgussrahmen eingeschraubt. Feld und Anker sind von Luftkanälen durchsetzt, die allerdings in einer

Ebene liegen, sodass die Luft nur unbedeutend durch den eigentlichen cylindrischen Luftzwischenraum bläst. Ein ziemlich vereinzelt dastehendes Modell einer Induktortype mit vielen Erregerspulen ist in Fig. 641 dargestellt. Es liegen immer drei Spulen übereinander, die mittlere wird indu-

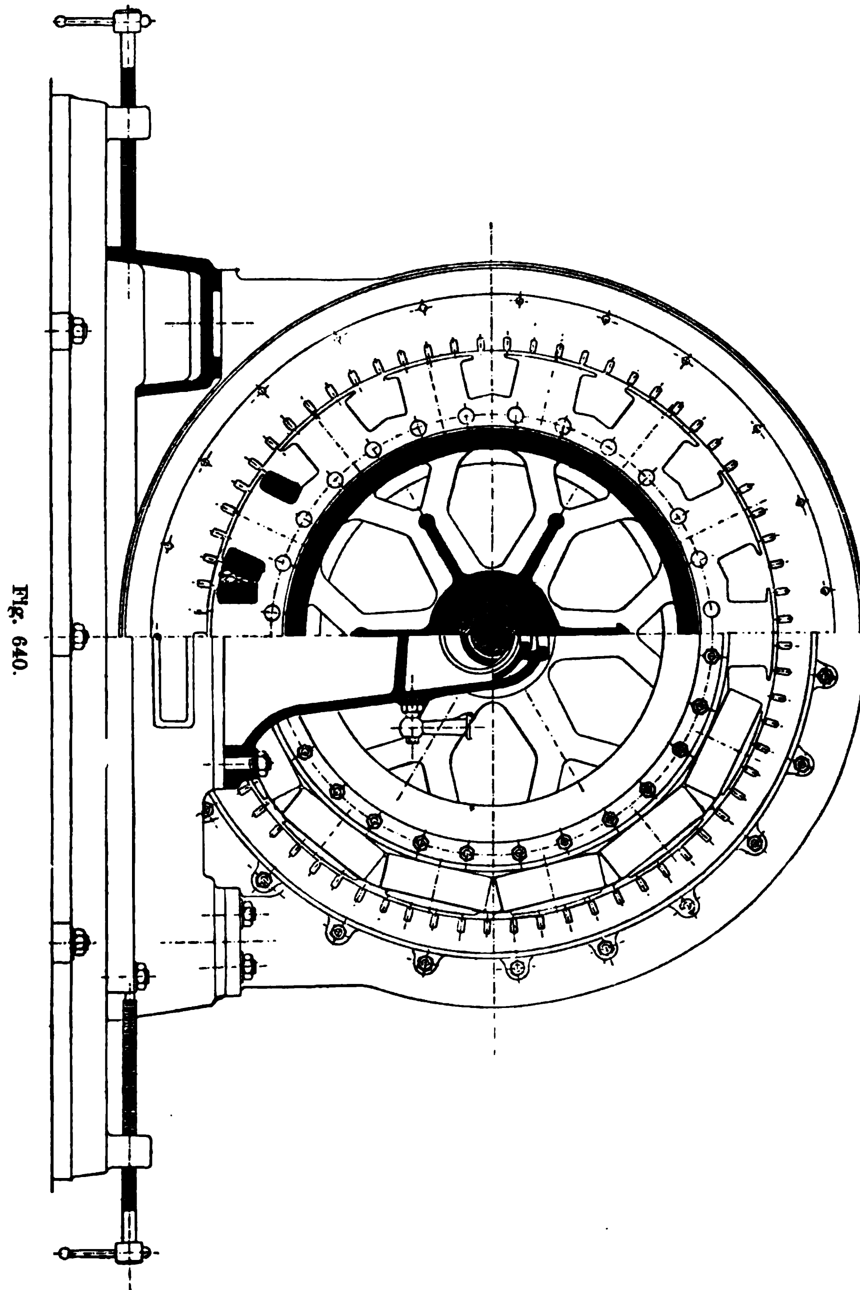
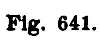
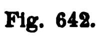


Fig. 640.

ziert, die äusseren dienen zur Erregung. Es sind 6 Polhörner und 18 Spulengruppen vorhanden, erstere sind geblättert. Die Spulen bestehen aus Kupferband und sind durch Keile festgehalten. Die Streuung dieser Maschine ist besonders gering.


Fig. 641.


Fig. 642.

Die wesentlichen Abmessungen einer 100 KW Drehstromdynamo von Guzzi, Ravizza & Co. sind sämtlich aus Fig. 642 u. 643[1]) zu entnehmen. Sie hat 3000 Volt Klemmenspannung, 20,8 Ampère pro Phase, 42 Perioden,

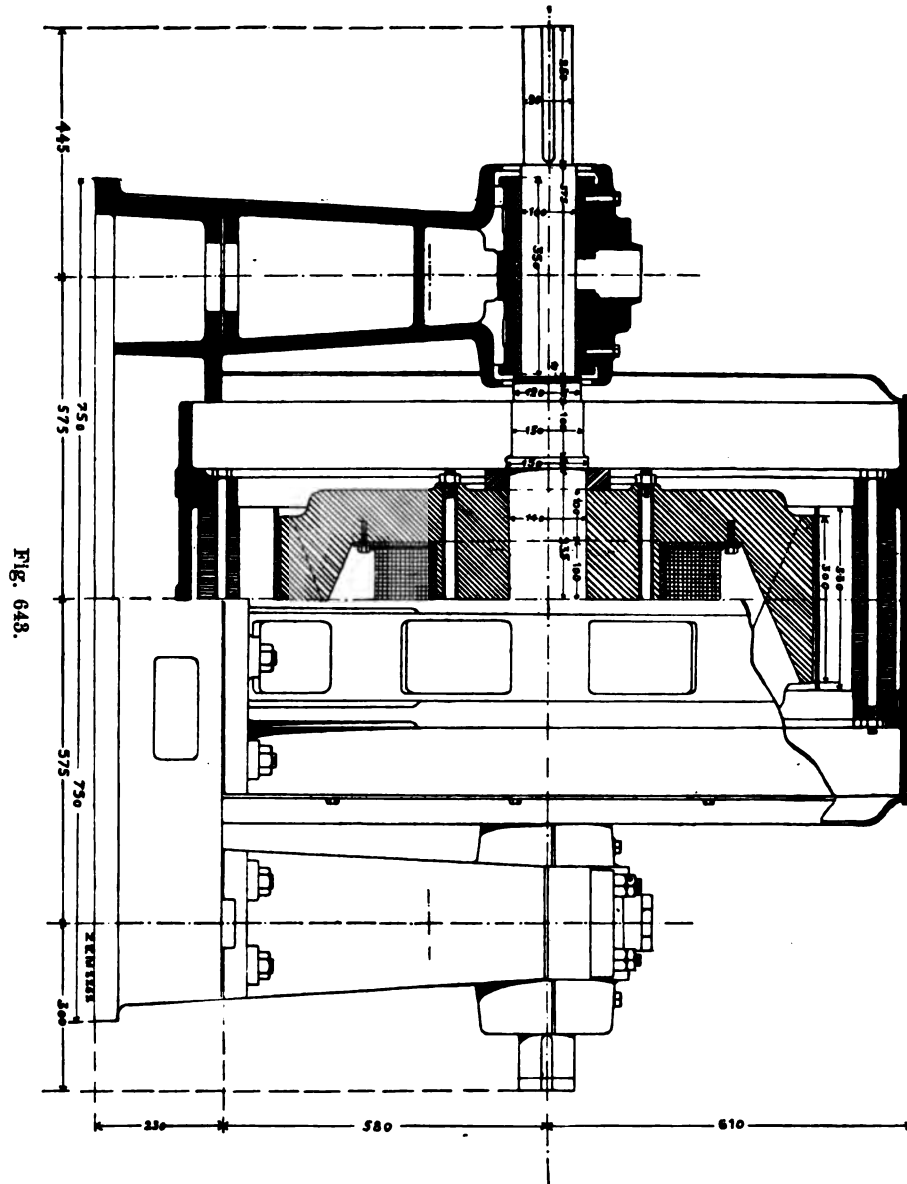


Fig. 643.

420 Touren, Wirkungsgrad 90 Proc. Der Ankerdraht ist 4,5 mm stark, 5,1 isoliert. Es sind 330 Erregerwindungen 5,0, isoliert 5,6 mm Draht aufgebracht.

1) Nach Z. f. E. u. M.

68. Nachtrag zu § 244 (Maschinenfabrik Oerlikon).

§ 253. Wechselstromgeneratoren der Maschinenfabrik Oerlikon.

Der Rotor der Inductortype (Fig. 644 u. 645) besteht aus einem vollkommen glatten Cylinder aus Grauguss oder Stahlguss, auf welchen in zwei

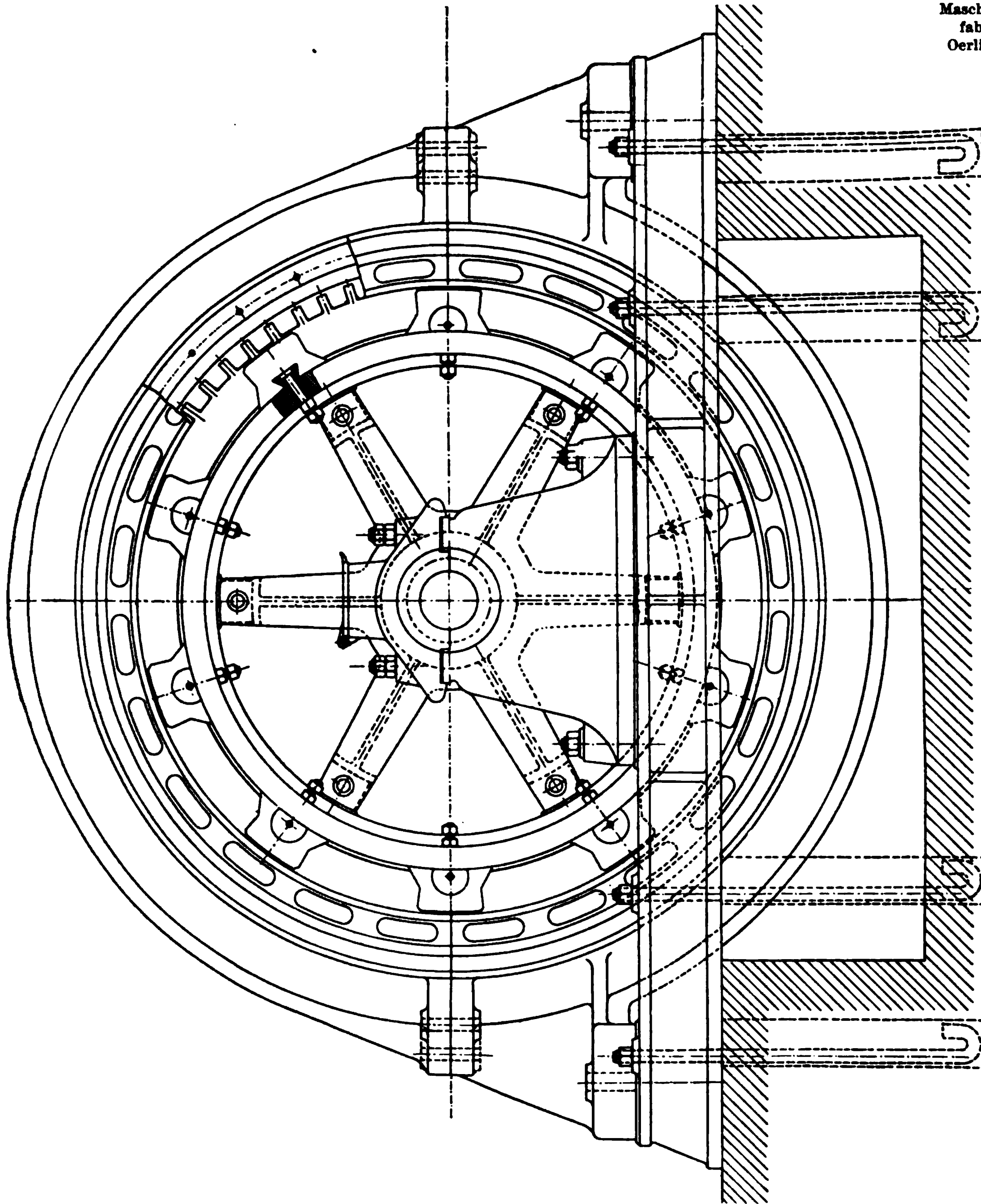
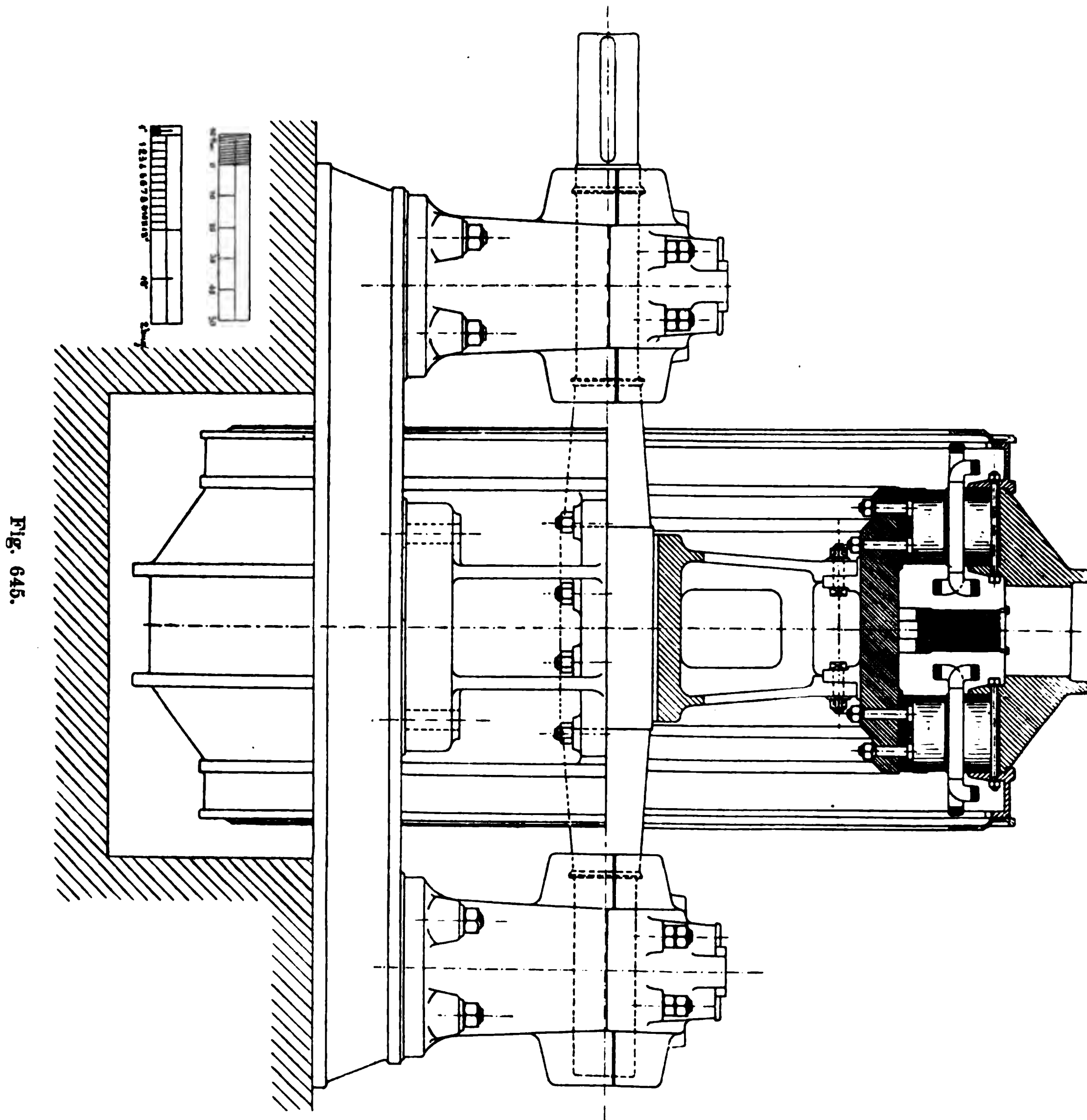


Fig. 644.

Reihen die Polhörner aus Blech mittelst Keilen und Schrauben aufgesetzt sind, so dass jedes Polhorn nach Lösen der Schrauben seitlich von den Keilen und von der Rotortrommel abgestreift werden kann.

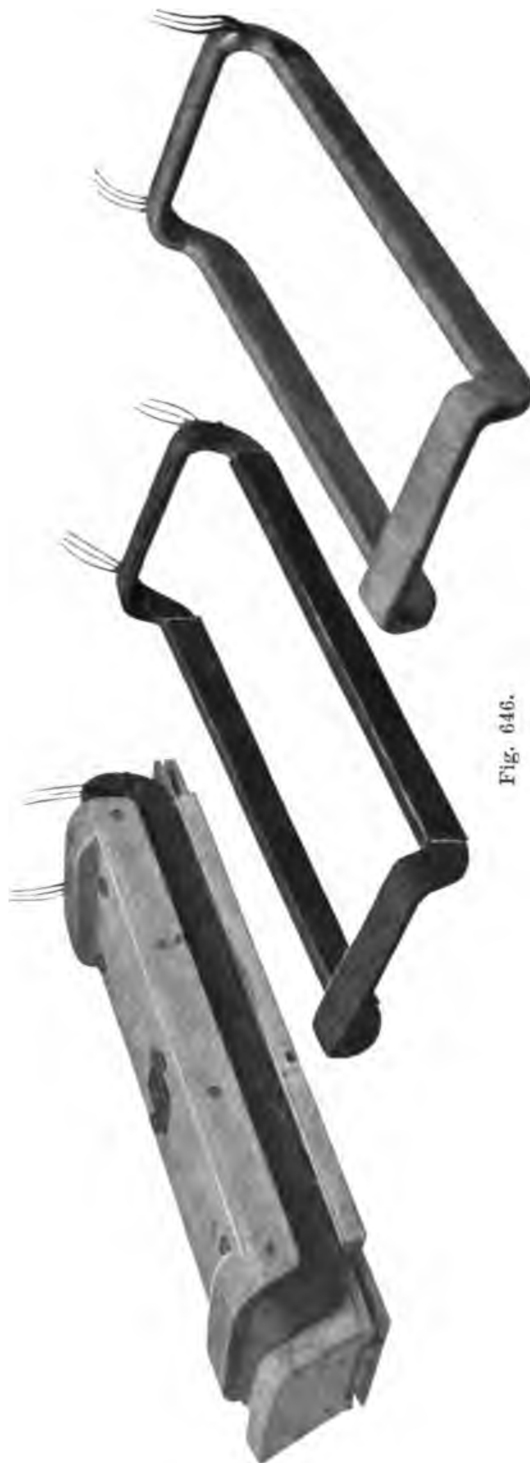
Die Armatur besteht aus zwei Blechringen mit offenen Nuten. In die nackten Nuten jedes Ringes werden die ausserhalb der Maschinen, in Schablonen fertiggewickelten und mit geschlossenen nahtlosen Mikanithülsen fertigisolierten Armaturspulen (Fig. 646) eingelegt und durch Fiberkeile gehalten, welche seitlich in Einkerbungen der Nute eingreifen. Die Armaturspulen


Fig. 645.

sind auf der Innenseite der Blechringe abwechselnd nach oben und unten abgebogen. Jede Spule kann, ohne dass die Maschine demontiert wird, entfernt und neu eingesetzt werden, nachdem ein Polhorn von der Rotortrommel abgestreift ist.

In den Gusscylinder des Gehäuses zwischen die beiden Armaturkränze ist die Erregerspule eingesetzt, welche in der Regel aus nacktem,

mit Asbestzwischenlagen aufgerolltem Kupferband besteht, vgl. Fig. 647. Die Wicklung füllt einerseits den Platz aus zwischen den Spulen der beiden Seiten und zwischen den beiden Reihen Polhörner des Rotors.


Fig. 646.

Der Gussmantel, welcher die beiden Blechkränze vereinigt, ist mit Ventilationsöffnungen versehen, durch welche der von den rotierenden Polhörnern erzeugte Luftzug, nachdem er die Wicklung der Feldspule umspült hat, entweicht. Die Zeichnung Fig. 644 u. 645 stellt einen Drehstromgenerator für 800 PS, 250 Touren und 8000 Volt dar.

Der Wirkungsgrad der normalen Ausführungen von 100 PS an beträgt im Mittel bei Volllast 93 Proc., bei Halblast 89 Proc., der Spannungsabfall bei inductiver Belastung 20 bis 30 Proc. der normalen Spannung. Die Erwärmung steigt in keinem Teil der Maschine über 35° C. über die Aussentemperatur. Der für die Erregung erforderliche Effekt beträgt 1 bis 0,5 Proc. der normalen Leistung.

Die Kurven Fig. 648 stellen die Resultate sorgfältiger Indicierversuche an einem 1500 PS Drehstromgenerator für 100 Touren im Elektricitätswerk Zürich dar.

Bei den Maschinen der Wechselpoltype mit höherer Tourenzahl wird das Magnetrad aus einem Blechkranz mit geraden glatten Polzacken gebildet, der auf einem gusseisernen Radstern befestigt ist. Die Polzacken besitzen

keine Polschuhe oder vorspringende Lappen (vgl. Fig. 650), so dass die Magnetspulen leicht aufgesetzt und abgestreift werden können. Diese Spulen werden durch eiserne oder bronzene Platten gehalten, welche zwischen zwei Polzacken

Fig. 647.

Fig. 648.

durch Schraubenbolzen mit dem Radkörper verbunden sind. Eine andere Spulenbefestigung besteht aus eisernen Reifen mit ⊥-förmigem Profil, welche in Einkerbungen auf beiden Längsseiten der Polzacken eingeschoben werden.

Die Spulen werden bei den kleineren Typen aus rundem Kupferdraht, bei den grösseren Typen aus hochkantig abgebogenem Kupferband mit Asbestzwischenlagen gewickelt.



Fig. 649.

Der Armaturkranz hat offene Nuten wie bei den Inductortypen. Die Spulen werden in Schablonen fertig gewickelt und nach besonderem Verfahren mit geschlossenen nahtlosen Mikanitröhren umgeben. Die Spulen werden in die offenen Nuten der Armatur ohne Pressung eingelegt und mit Fiberkeilen, die seitwärts in Einkerbungen der Nut eingreifen, gehalten.



Fig. 650.

Bei den „Schwungradmaschinen" werden die aus Blech zusammengenieteten, mit Polschuhen und einem schwalbenschwanzartigen Fuss versehenen Polkerne auf dem Schwungring mit Keilen, die durch Schraubenbolzen zwischen



Fig. 651.

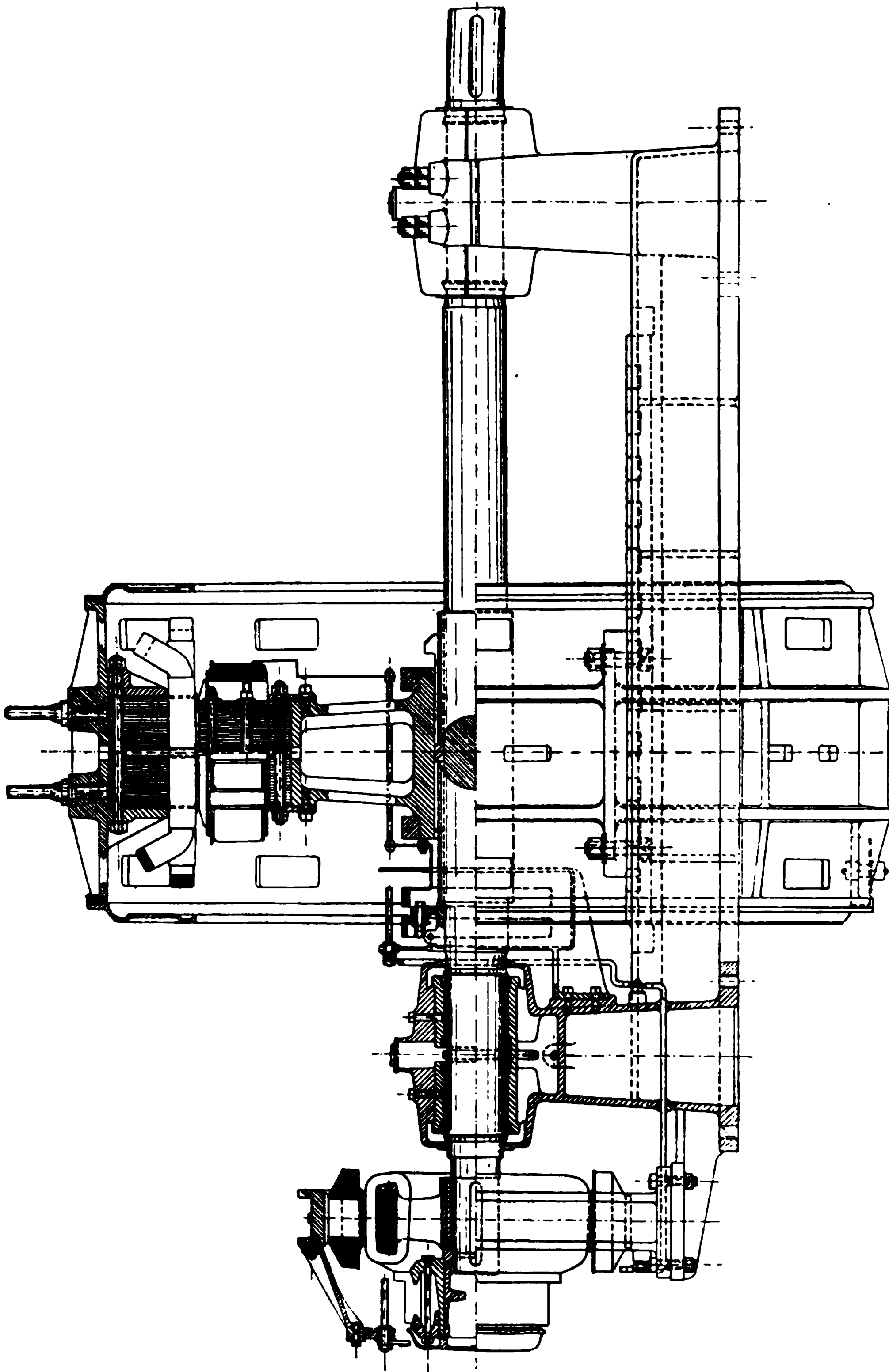


Fig. 652.

die Füsse je zweier Polkerne gepresst werden, befestigt. Nach Lösen der Schraubenbolzen kann jeder Polkern mit seiner Spule zwischen den Keilen in achsialer Richtung abgeschoben und die Spule abgestreift werden (vgl. Fig. 649).

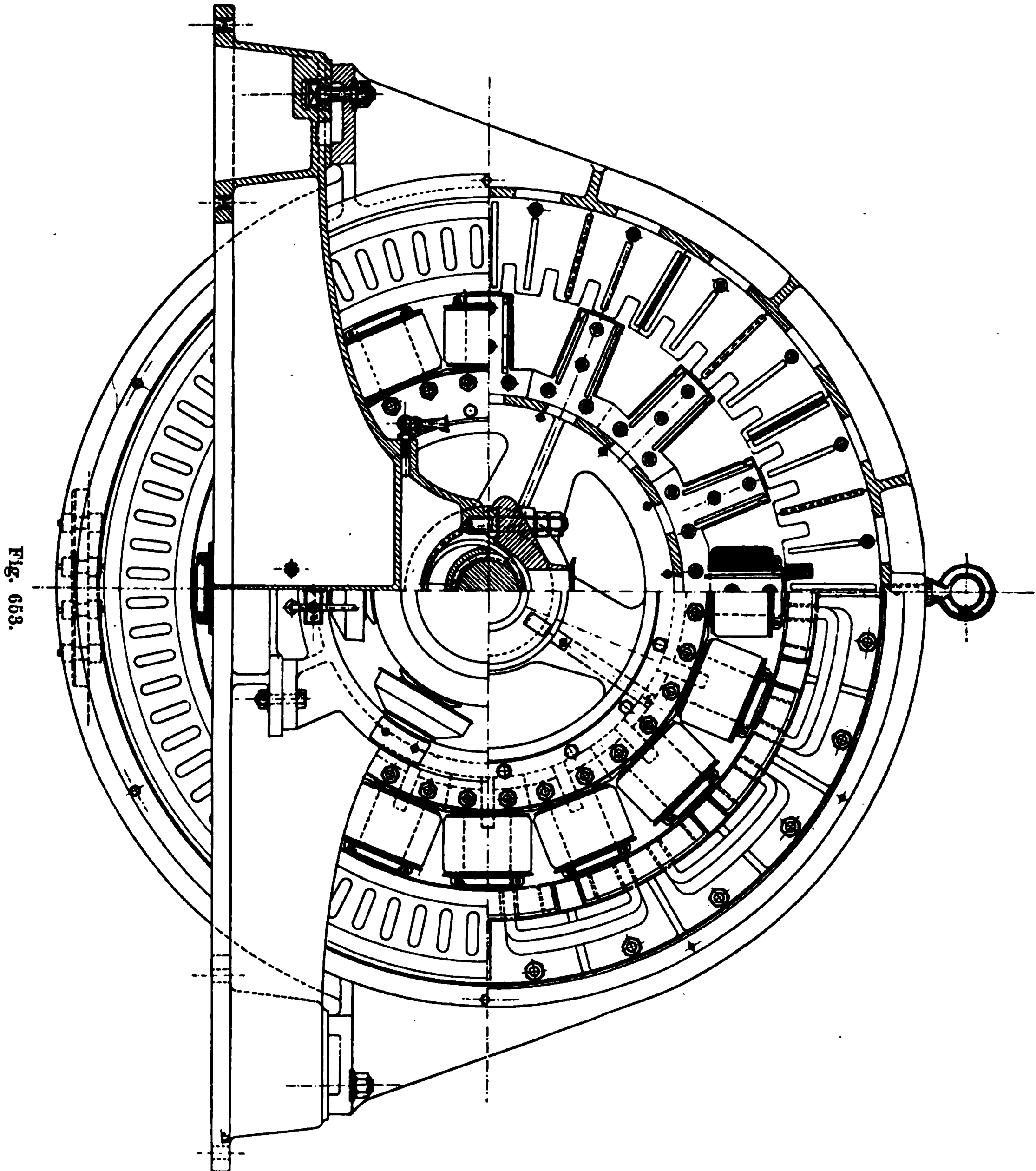


Fig. 653.

Bei einer andern Konstruktion von Schwungradmaschinen werden die Pole mit ihren Spulen im Innern des Schwungringes angeordnet, so dass sie ausserhalb der feststehenden Armatur rotieren. Das Magnetsystem ist aus einem Blechkranz mit nach innen vorstehenden glatten Polzacken ohne Polschuhe gebildet, auf welche die Spulen geschoben und durch Blechplatten

gehalten werden, die zwischen zwei Polzacken in seitliche Einkerbungen eingepasst sind. Der Blechkranz besteht aus Segmenten, die durch Pressringe in dem Schwungrad gehalten werden.

Das Bild Fig. 651 stellt eine derartige Konstruktion eines Drehstromgenerators für 700 PS bei 94 Touren dar.

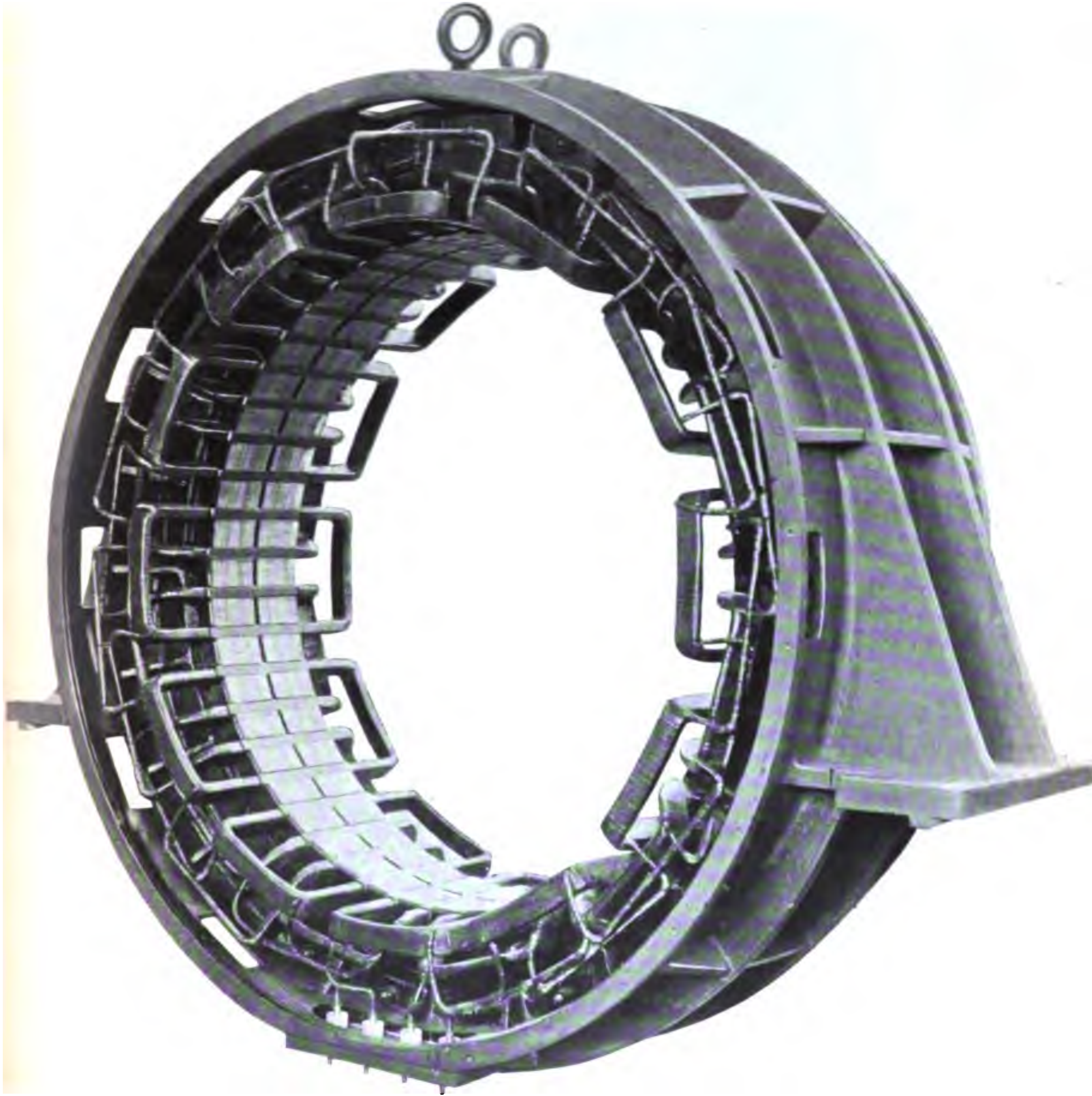


Fig. 654.

Die Generatoren sind so dimensioniert, dass der Nutzeffekt bei Volllast bei den normalen Typen über 100 PS über 93 Proc. und bei Halblast über 89 Proc. beträgt. Der Spannungsabfall bei Motorenbelastung mit einem Leistungsfaktor 0,8 beträgt etwa 25 Proc. Die Temperaturerhöhung steigt in keinem Fall über 35 ⁰ C. über die umgebende Luft.

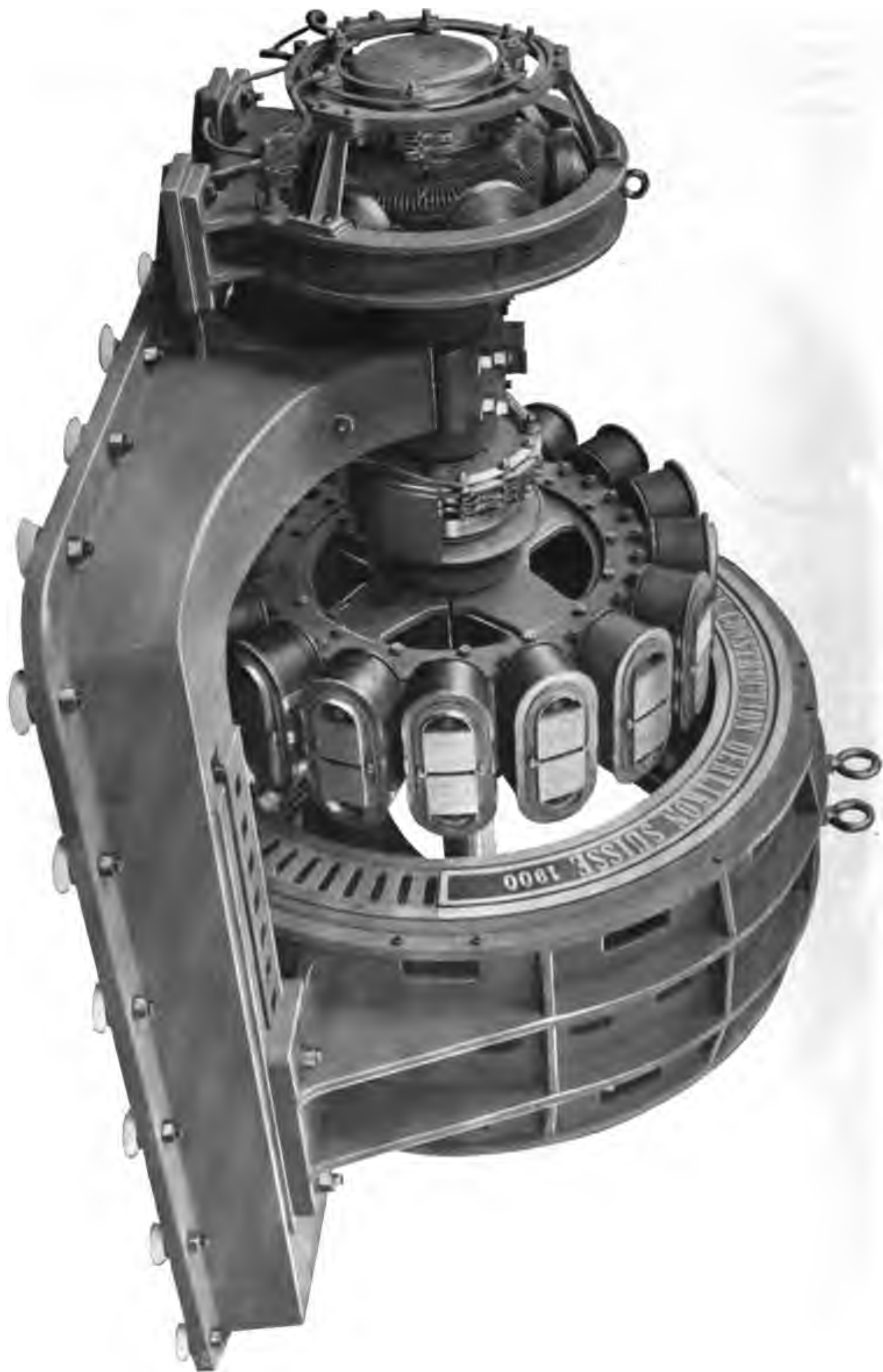


Fig. 655.

Fig. 652 und 653 ist die Zeichnung eines normalen 500 PS Drehstromgenerators für 400 Touren. Die fertige Armatur dieses Generators ist im

Fig. 656.

Bild Fig. 654 wiedergegeben, und die fertige Maschine mit verschobener Armatur in Fig. 655.

Fig. 656 ist die Abbildung eines 1300 PS Generators für 75 Touren.



Sachregister.

(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)

mD

